



HAL
open science

ETUDE DE LA GENERATION DES STREAMERS DANS L'HUILE MINERALE SOUS TENSION IMPULSIONNELLE ET ALTERNATIVE

Top Tran Van

► **To cite this version:**

Top Tran Van. ETUDE DE LA GENERATION DES STREAMERS DANS L'HUILE MINERALE SOUS TENSION IMPULSIONNELLE ET ALTERNATIVE. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1999. Français. NNT : . tel-00783523

HAL Id: tel-00783523

<https://theses.hal.science/tel-00783523>

Submitted on 1 Feb 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.



T 610

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

**THESE**

pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLEDiscipline: **GENIE ELECTRIQUE**

présentée et soutenue publiquement par

TRAN VAN Top

(Ingénieur Electricien de l'Institut Polytechnique de Kharkov Ukraine)

Titre

**ETUDE DE LA GENERATION DES STREAMERS DANS L'HUILE MINERALE
SOUS TENSION IMPULSIONNELLE ET ALTERNATIVE**

le 25 Janvier 1999

 Directeur de thèse
M. **O. LESAINT**JURY

M.	BUI AI	Rapporteur
M.	G. TOUCHARD	Rapporteur
M.	M. IVANES	Examineur
M.	M. MAILHOT	Examineur
M.	P. RAIN	Examineur

Thèse préparée au sein du

LABORATOIRE d'ELECTROSTATIQUE et de MATERIAUX DIELECTRIQUES

25 Avenue des Martyrs, BP 166- 38042 Grenoble



THESE

pour obtenir le grade de
DOCTEUR de l'**INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**
Discipline: **GENIE ELECTRIQUE**

présentée et soutenue publiquement par

TRAN VAN Top

(Ingénieur Electricien de l'Institut Polytechnique de Kharkov Ukraine)

Titre

**ETUDE DE LA GENERATION DES STREAMERS DANS L'HUILE MINERALE
SOUS TENSION IMPULSIONNELLE ET ALTERNATIVE**

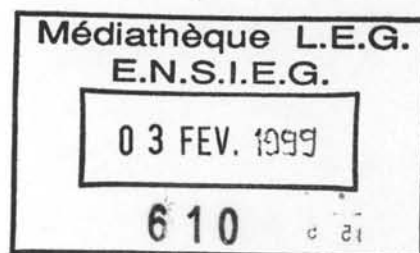
le 25 Janvier 1999

Directeur de thèse

M. **O. LESANT**

JURY

M.	BUI AI	Rapporteur
M.	G. TOUCHARD	Rapporteur
M.	M. IVANES	Examineur
M.	M. MAILHOT	Examineur
M.	P. RAIN	Examineur



Thèse préparée au sein du

LABORATOIRE d'ELECTROSTATIQUE et de MATERIAUX DIELECTRIQUES

25 Avenue des Martyrs, BP 166- 38042 Grenoble

*A mes parents,
à ma femme Nguyệt Linh
et à mes fils Thiện Hoàng & Thiện Phong,
qui m'ont beaucoup encouragé
pour effectuer cette thèse*

*Vinh hạnh này xin giành cho
Cha mẹ tôi,
Nguyệt Linh và các con Thiện Hoàng & Thiện Phong,
niềm động viên lớn lao giúp tôi vượt qua năm tháng
để hoàn thành luận án này.*

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques (LEM'D) du Centre National de la Recherche Scientifique de Grenoble sous la direction de Monsieur Olivier L'ESAIN'T, chargé de recherche au LEM'D. Je tiens tout d'abord à le remercier pour avoir assuré l'encadrement de mon travail. Il m'a fait bénéficier de sa grande expérience et n'a cessé de me prodiguer idées, conseils et encouragements. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie Messieurs J. P. GOSSE et A. DENAT, successivement Directeurs du laboratoire pour m'avoir accueilli et permis de réaliser cette thèse dans leur laboratoire.

Mes sincères remerciements s'adressent aux membres du jury :

Messieurs BUI AI et G. TOUCHARD, respectivement Directeur de Recherches au laboratoire de Génie Electrique de Toulouse (LGET) et Professeur à l'Université de Poitiers pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse;

Monsieur M. IVAN'ES, Professeur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), et responsable de la formation Doctorale de Génie Electrique pour avoir participé au jury;

Messieurs M. MAILHOT et P. RAIN, respectivement Chef du Laboratoire à la Société Jeumont Schneider Transformateurs (JST) de Lyon et Maître de Conférence à l'Université Joseph-Fourier (UJF) de Grenoble pour avoir accepté d'être membres du Jury de cette thèse.

Je tiens à remercier Monsieur R. TOBAZEON, Directeur de recherche au CNRS, pour m'avoir accueilli dans son équipe et pour ses encouragements. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde et respectueuse gratitude.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur M. HILAIRE, Technicien au LEM'D, pour l'efficacité dont il a fait preuve dans la réalisation des dispositifs expérimentaux, notamment lors de la mise au point du dispositif de traitement d'huile, qui m'ont été nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier tout le personnel du Laboratoire pour leurs précieux conseils et les nombreux services qu'ils m'ont rendus. Il m'est impossible d'en dresser la liste complète et je les prie de m'en excuser. Je dois cependant mentionner Mesdames P. FABIANO et C. ROUX et Messieurs G. LAULLIER, F. MONTANVERT, P. ATTEN, J. FILIPPINI, J. P. ROUX.

Je remercie chaleureusement mes collègues Post-Doctorants : Gaston MASSALA, Harman REDOUANE, Muhamed NUR, Fathi JOMNI, Frédéric AITKEN et Doctorants : Hervé DEBRUYNE, Didier BRANCHARD, Khalin CHOUMAN, Alexandre QUENIN, Frédéric LE COEUR, Ahcène LEMZADMI, Jean-Hervé TORTAI, Marius DUMITRAN, Laurentia DUMITRESCU pour leurs conseils et l'amitié constante qu'ils m'ont apportée.

Je tiens à remercier Mesdames Marie-Thères LÉPROUX, Hélène BERNARD; Mireille RADZYNER, Magdeleine DURAFFOURG au service d'Accueil des étudiants étrangers du CROUS de Grenoble pour les multiples services qu'ils m'ont rendus.

A tous mes amis vietnamiens à Grenoble qui m'ont beaucoup encouragé dans les moments difficiles et avec qui j'ai eu le plaisir de partager de très bons moments pendant ces quatre années de séjour en France.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à mes parents, à ma femme Nguyet Linh et à mes enfants Thien Hoang & Thien Phong, sans lesquels je ne terminerais pas cette thèse.

Grenoble Janvier 1999



TRAN VAN Top

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	15
CHAPITRE 1	
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA GENERATION DES STREAMERS DANS LES LIQUIDES DIELECTRIQUES.....	19
1.1 INTRODUCTION.....	19
1.2 SYSTEMES D'ELECTRODES UTILISES.....	20
1.2.1 Configuration divergente pointe-plan.....	21
1.2.2 Géométrie peu divergente (tige-plan).....	23
1.2.3 Géométrie uniforme ou quasi-uniforme.....	23
1.2.4 Géométrie semi-uniforme.....	23
1.3 PROPAGATION DES STREAMERS DANS LES LIQUIDES.....	25
1.3.1 Caractères généraux.....	25
1.3.2 Mécanismes de propagation.....	27
1.3.2.1 Streamers lents en buisson.....	27
1.3.2.2 Streamers filamenteux.....	28
1.4 GENERATION DES STREAMERS SOUS TENSION CONTINUE ET IMPULSIONNELLE.....	29
1.4.1 Génération des streamers négatifs en géométrie pointe-plan sous tension continue.....	29
1.4.1.1 Génération de bulles.....	30
1.4.1.2 Transition de la bulle en streamer négatif lent.....	31
1.4.2 Génération des streamers positifs en géométrie pointe-plan.....	32
1.4.2.1 Tension continue.....	32
1.4.2.2 Impulsion de tension : Travaux de Gournay et Lesaint.....	33
a) Influence de la distance inter-électrode, du rayon de courbure.....	34
b) Influence de la nature du liquide.....	34
c) Cas de l'huile de transformateur.....	36
1.4.3 Génération des streamers dans des géométries différentes.....	36
1.4.3.1 Champ peu divergent (tiges arrondies).....	36
1.4.3.2 Champ uniforme ou quasi-uniforme.....	38
1.4.3.3 Géométrie semi-uniforme.....	39
1.5 GENERATION DES STREAMERS SOUS TENSION ALTERNATIVE.....	41
1.5.1 Préambule.....	41
1.5.2 Génération des streamers en géométrie divergente.....	42

1.6 <i>CLAQUAGE EN CHAMP FAIBLEMENT DIVERGENT</i>	44
1.6.1 Effet d'échelle.....	44
1.6.1.1 Effet de volume.....	44
1.6.1.2 Effet de surface.....	46
1.6.1.3 Travail de N. Giao Trinh et al.....	46
1.6.2 Effet des particules	46
1.6.2.1 Claquage déclenché par une seule particule métallique.....	48
1.6.2.2 Claquage provoqué par de nombreuses particules	49
1.6.3 Effet de la teneur en eau	51
CHAPITRE 2	
TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	57
2.1 <i>PREAMBULE</i>	57
2.2 <i>SYSTEMES D'ELECTRODES</i>	57
2.3 <i>CELLULES D'ESSAIS</i>	57
2.3.1 Première cellule.....	57
2.3.2 Deuxième cellule.....	59
2.3.3 Troisième cellule	60
2.4 <i>LIQUIDE UTILISE ET TRAITEMENT</i>	61
2.4.1 Liquide utilisé.....	61
2.4.2 Système de traitement de l'huile.....	61
2.4.2.1 Filtration de l'huile.....	61
2.4.2.2 Déshydratation.....	62
2.4.2.3 Contrôle du l'état de l'huile.....	62
a) Comptage de particules.....	62
b) Mesure de la teneur en eau	63
c) Addition des particules.....	63
2.5 <i>DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX</i>	63
2.5.1 Dispositifs d'essais sous tension impulsionnelle.....	63
2.5.1.1 Générateur de créneaux de tension à éclateurs	63
2.5.1.2 Générateur de Marx	64
2.5.1.3 Premier montage expérimental avec le générateur à éclateurs.....	65
2.5.1.4 Deuxième montage expérimental avec le générateur de Marx	65
2.5.2 Dispositif d'essais sous tension alternative.....	67

2.6 SYSTEME DE VISUALISATION.....	68
2.7 MESURES DE COURANT ET DE LUMIERE.....	69
2.7.1 Mesures de courant	69
2.7.2 Mesure des photocourants.....	70

CHAPITRE 3

EFFETS DE LA GEOMETRIE ET DE LA POLLUTION SUR LA GENERATION DES STREAMERS SOUS TENSION ALTERNATIVE	73
---	----

3.1 EFFETS DE LA GEOMETRIE SUR LA GENERATION DES STREAMERS	73
--	----

3.1.1 Généralités.....	73
------------------------	----

3.1.1.1 Détection des streamers.....	73
--------------------------------------	----

3.1.1.2 Tension de génération des streamers.....	73
--	----

3.1.2 Géométrie pointe-plan ou tige-plan	75
--	----

3.1.2.1 Observations.....	75
---------------------------	----

3.1.2.2 Influence du rayon de courbure de l'électrode.....	76
--	----

3.1.2.3 Influence de la distance inter-électrodes.....	78
--	----

3.1.3 Essais en géométrie sphère-plan avec électrode d'amorçage.....	78
--	----

3.1.4 Champ de génération des streamers.....	79
--	----

3.1.4.1 Fréquence d'apparition des streamers en fonction du champ.....	79
--	----

3.1.4.2 Influence du rayon de courbure.....	81
---	----

3.1.4.3 Commentaires	82
----------------------------	----

3.2 EFFETS DE LA POLLUTION.....	83
---------------------------------	----

3.2.1 Effet des particules	83
----------------------------------	----

3.2.1.1 Influence des particules métalliques.....	83
---	----

a) Particules de cuivre.....	83
------------------------------	----

b) Particule d'aluminium.....	83
-------------------------------	----

b) Particules de carbone	86
--------------------------------	----

3.2.1.2 Influence des particules de cellulose.....	87
--	----

a) Généralités.....	87
---------------------	----

b) Visualisation du mouvement des particules	89
--	----

c) Influence du mouvement de l'huile	90
--	----

d) Fréquence d'apparition des streamers.....	91
--	----

3.2.2 Influence de la teneur en eau.....	95
--	----

3.2.2.1 Huile filtrée	95
-----------------------------	----

3.2.2.2 En présence des particules de cellulose	96
---	----

3.2.2.3 Commentaires	98
----------------------------	----

3.2.3 Influence de la pollution sur le claquage.....	98
3.2.3.1 Méthode pour déterminer la tension de claquage	98
3.2.3.2 Claquage dans l'huile filtrée	99
3.2.3.3 Influence des particules de cellulose.....	100
3.2.3.4 Commentaires	101
3.3 DISCUSSION ET CONCLUSIONS.....	103

CHAPITRE 4

GENERATION DES STREAMERS SOUS TENSION IMPULSIONNELLE EN GEOMETRIE POINTE-PLAN ET SEMI-UNIFORME.....	109
--	-----

4.1 GEOMETRIES POINTE-PLAN ET TIGE-PLAN.....	109
4.1.1 Généralités.....	109
4.1.1.1 Méthodes expérimentales	109
a) Méthode de détection par ombroscopie.....	110
b) Détection par courant et photocourant associé.....	110
4.1.1.2 Définition de la tension de génération.....	111
4.1.2 Champ fortement divergent pointe-plan ($r_p < 10 \mu\text{m}$, $d = 6 \text{ mm}$).....	111
4.1.2.1 Polarité négative	113
4.1.2.2 Polarité positive.....	115
a) <u>Mode de streamer positif lent</u>	115
b) <u>Mode de streamer positif rapide</u>	116
4.1.2.3 Commentaires	117
4.1.3 Géométrie pointe-plan ($10 \mu\text{m} < r_p < 200 \mu\text{m}$, $d = 6 \text{ mm}$).....	118
4.1.3.1 Observations.....	118
4.1.3.2 Tensions d'apparition.....	119
4.1.4 Géométrie tige-plan ($0,5 \text{ mm} < r_p < 20 \text{ mm}$).....	120
4.1.4.1 Mesure du courant et du photocourant	120
4.1.4.2 Temps de retard à la génération.....	121
4.1.4.3 Temps de propagation.....	122
4.1.4.4 Tension de génération des streamers.....	123
4.1.5 Analyse des résultats en champ divergent.....	124
4.1.5.1 Forme et vitesse des streamers.....	124
4.1.5.2 Tension d'apparition.....	124
4.1.5.3 Champ de génération des streamers.....	125

4.2 GEOMETRIE SEMI-UNIFORME.....	126
4.2.1 Description des phénomènes observés.....	127
4.2.1.1 Effet sur la forme des streamers.....	127
4.2.1.2 Effet sur la tension d'apparition des streamers.....	128
4.2.1.3 Influence de la teneur en eau.....	129
4.2.2 Influence des paramètres géométriques.....	129
4.2.2.1 Influence de la distance inter-électrodes d	130
4.2.2.2 Influence de la longueur h de la pointe.....	131
4.2.2.3 Influence du rayon de courbure de la pointe.....	133
4.2.3 Analyse des résultats en géométrie semi-uniforme.....	135
4.2.3.1 Commentaires.....	135
4.2.3.2 Champ moyen de génération.....	135
4.2.3.3 Calcul du champ de génération.....	136
a) Modèle d'un cylindre.....	137
b) Modèle d'un demi-éllipsoïde.....	138
c) Calculé numérique du champ de génération par CSP.....	139
4.2.3.4 Calcul de la tension d'apparition des streamers.....	141
4.3 DISCUSSION SUR LA GENERATION DES STREAMERS SOUS TENSION IMPULSIONNELLE.....	142
4.3.1 Décroissance du champ de génération avec r_p	142
4.3.2 Effet de surface.....	147
4.3.3 Comparaison la génération sous tension impulsionnelle et alternative.....	148
4.4 PROPAGATION DES STREAMERS EN GEOMETRIE SEMI-UNIFORME.....	149
4.4.1 Longueur d'arrêt.....	150
4.4.2 Tension de claquage.....	151
4.4.3 Vitesse de propagation.....	152
4.4.4 Discussion et conclusions sur la propagation des streamers.....	154
CONCLUSIONS GENERALES.....	159
ANNEXES.....	163
Annexe A.1 Caractéristiques de l'huile VOLTESSO 35.....	163
Annexe A.2 Comptage des particules.....	164
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	169

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Ayant des bonnes propriétés diélectriques et thermiques, l'huile minérale a été et demeure encore le liquide isolant le plus utilisé en association avec des solides isolants dans certains appareils électriques à très haute tension tels que les transformateurs de puissance. En remplissant les interstices entre les solides isolants et les conducteurs et en imprégnant les solides eux-mêmes, l'huile permet d'éliminer les décharges partielles susceptibles de se produire dans les cavités gazeuses.

Le claquage des liquides résulte de divers phénomènes complexes. La tension de claquage ne dépend pas uniquement des propriétés du liquide lui-même, mais d'un très grand nombre de facteurs tels que la géométrie des électrodes, le type de tension utilisée, la présence d'impuretés, d'eau, etc. Parmi les différentes propriétés électriques des liquides, le problème de la tenue diélectrique est, sans aucun doute, le plus important dans les applications. Avant le claquage proprement dit, où se développe un arc électrique, il existe une période de préclaquage. Les phénomènes prédisruptifs se développent en deux phases : une phase de génération d'un canal gazeux lumineux plus ou moins conducteur dénommé "*streamer*" et une phase de propagation. La compréhension des mécanismes mis en jeu permet de comprendre l'origine des phénomènes de claquage. Le claquage intervient lorsque le streamer traverse la totalité de l'espace inter-électrode et court-circuite les deux électrodes. Selon les cas, le claquage peut être contrôlé par la génération ou par la propagation des streamers.

Actuellement, la phase de propagation a été la plus étudiée. Les caractéristiques des streamers (forme, vitesse) et l'influence de différents paramètres sur leur développement (géométrie du champ, forme et amplitude de la tension, nature du liquide, additifs...) ont été largement étudiées pour les petits interstices ainsi qu'à grande distance inter-électrodes, essentiellement en polarité positive où les streamers sont plus dangereux.

En revanche, la phase de génération des streamers a été beaucoup moins étudiée. Le plus souvent, les études ont été réalisées en géométrie très divergente sous impulsions de tension, et plus rarement sous tension continue ou alternative. Les mécanismes de génération des streamers ont été mis en évidence essentiellement dans les hydrocarbures ultrapurs en géométrie pointe-plan avec des pointes de très faible rayon de courbure (quelques μm). Dans l'huile minérale utilisée dans les transformateurs de puissance, l'influence des paramètres expérimentaux sur la génération des streamers tels que la dimension des électrodes (rayon de courbure, distance), la forme de la tension, les polluants (particules, eau), qui ont une grande importance dans la pratique, n'a pas été étudiée de façon systématique.

Il existe un certain nombre d'études de l'influence de ces paramètres sur la tension de claquage dans l'huile. Des effets liés à la présence des particules ou encore aux effets de volume et

de surface ont été rapportés. L'explication de ces effets et leur transposition au cas d'un appareil réel reste assez incertaine.

L'objectif de cette thèse consiste donc à développer une étude de la génération des streamers dans l'huile minérale avec des conditions proches de celles rencontrées dans les applications : champ peu divergent alternatif, en présence de certains polluants souvent rencontrés dans les appareils réels.

Le premier chapitre sera consacré à une analyse des connaissances acquises sur les phénomènes prédisruptifs dans les liquides, en sélectionnant les travaux concernant principalement la phase de génération des streamers.

Le deuxième chapitre présentera les techniques et les méthodes utilisées au cours de nos expérimentations.

Le troisième chapitre sera consacré à une étude de la génération des streamers et du claquage sous tension alternative dans des conditions expérimentales les plus réalistes possibles (grands volumes d'huile, champs faibles, en présence de divers polluants).

Dans le quatrième chapitre, nous étudierons l'influence de la géométrie des électrodes sur la génération des streamers sous impulsions de tension. Cette étude sera effectuée avec deux géométries différentes : pointe-plan (ou tige plan), et semi-uniforme afin de caractériser la génération et la propagation des streamers déclenchés par des aspérités ou des particules.

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

***GENERATION DES STREAMERS
DANS LES LIQUIDES DIELECTRIQUES***

Sommaire

<i>1.1 INTRODUCTION.....</i>	<i>19</i>
<i>1.2 SYSTEMES D'ELECTRODES UTILISES</i>	<i>20</i>
<i>1.3 PROPAGATION DES STREAMERS DANS LES LIQUIDES.....</i>	<i>25</i>
<i>1.4 GENERATION DES STREAMERS.....</i>	<i>29</i>
<i>1.5 GENERATION DES STREAMERS SOUS TENSION ALTERNATIVE.....</i>	<i>41</i>
<i>1.6 CLAQUAGE EN CHAMP FAIBLEMENT DIVERGENT.....</i>	<i>44</i>

CHAPITRE 1 : *ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE LA GENERATION DES STREAMERS DANS LES LIQUIDES DIELECTRIQUES*

Dans ce chapitre, nous présentons une étude bibliographique en sélectionnant les travaux antérieurs concernant notre étude.

Nous présentons en premier lieu les caractères généraux des streamers et les configurations d'électrodes utilisées. Nous rappellerons quelques points importants concernant la phase de propagation. Nous nous arrêterons plus en détail sur les facteurs qui influencent la génération des streamers tels que l'effet de la géométrie, de la polarité, de la forme de tension et des pollutions.

1.1 INTRODUCTION

La conduction et le claquage des liquides diélectriques ont été étudiés depuis plus d'un siècle. Le claquage, accompagné d'émission de lumière, a été pour la première fois observé dans l'huile minérale par Faraday en 1838, comme l'ont rapporté Goodlet et al. [GOOD31]. Les premières études détaillées sur les phénomènes lumineux précurseurs du claquage ont été réalisées en 1945 par Komelkov [KOME45] et en 1953 par Liao et Anderson [LIAO53]. Leur comportement a tout d'abord été interprété en appliquant les mécanismes des décharges dans l'air (ionisation par collision, avalanches électroniques) [HIP37, LEW56]. Pour nommer les phénomènes observés dans les liquides, le terme "*streamer*" a été emprunté à la théorie du claquage dans les gaz par Liao et Anderson [LIAO53]. Par la suite, son emploi a été étendu à tous les phénomènes prédisruptifs dans les liquides. Le terme "*leader*" a également été utilisé dans quelques études [KOME45, TORS95].

L'étude des phénomènes de streamers dans les liquides diélectriques a été l'objet de nombreux travaux pendant les trois dernières décennies. La caractérisation a été beaucoup améliorée grâce à l'utilisation de nouvelles techniques de mesures : oscilloscopes à large bande passante, méthodes optiques de visualisation rapide par ombroscopie ou strioscopie, caméras à balayage de fente (*streak cameras*) qui permettent de suivre en continu le phénomène, effet Kerr pour les mesures de la distribution du champ, spectroscopie de la lumière émise, etc..

Ce sont Hakim et Higham [HAKI61] et Farazmand [FARA61] qui ont, pour la première fois, publié les photographies des streamers obtenues par strioscopie mettant en évidence une région de faible densité, formée au voisinage d'une pointe quelques microsecondes avant le claquage. Stekol'nikov et Ushakov [STEL66, USHA66], en utilisant les premières caméras électroniques à balayage, ont obtenu des photographies de la lumière émise par les streamers dans l'huile minérale avec une bonne résolution spatiale et temporelle.

Depuis, de nombreuses études ont été réalisées dans des liquides de natures très diverses et sous des conditions expérimentales variées. Malgré tout, les processus fondamentaux conduisant au claquage des liquides, restent beaucoup moins bien connus que dans les gaz. Par exemple, la théorie du claquage de l'air, proposée il y a presque un siècle par Townsend, a reçu une vérification expérimentale et a été étendue aux autres gaz. Les mécanismes fondamentaux de cette théorie tels que la multiplication électronique due à l'ionisation par choc, l'émission des électrons de la cathode et la photoionisation formant les streamers secondaires et les leaders ont été mis en évidence. Dans les liquides, l'existence d'un mécanisme d'avalanche électronique n'a été mise en évidence que très récemment en géométrie pointe-plan. L'interprétation des phénomènes de décharges est cependant difficile du fait de la grande complexité et de la diversité des mécanismes mis en jeu. Ceci est lié en grande partie au fait que la connaissance des propriétés physiques de l'état liquide est moins développée que celles des gaz et des solides. Dans un milieu dense, les interactions des électrons avec les molécules sont plus fortes que dans les gaz, le libre parcours moyen est de l'ordre de la dimension moléculaire, et les champs électriques nécessaires pour provoquer l'ionisation sont très élevés (plusieurs MV/cm).

1.2 SYSTEMES D'ELECTRODES UTILISES

Dans le but d'obtenir un maximum d'informations, les études sur les streamers ont été réalisées en faisant varier largement les conditions expérimentales (liquide, géométrie d'électrodes, forme et amplitude de la tension, température, pression, viscosité, additif, etc.).

Dans les liquides, les expériences en géométrie uniforme sont difficiles à réaliser (nécessité de haute tension, claquages fréquents, grande dispersion des résultats...). L'utilisation d'une géométrie divergente sous tension impulsionnelle permet de caractériser les streamers de façon plus pratique. La figure 1.1 montre les différentes géométries d'électrodes utilisées.

1.2.1 CONFIGURATION DIVERGENTE POINTE-PLAN

La géométrie pointe-plan (figure 1.1a) permet de maîtriser les conditions et le lieu de génération des streamers, favorisant leur visualisation, elle nécessite une tension moins élevée que celle imposée par la géométrie uniforme. Elle est constituée d'une pointe de faible rayon de courbure (quelques μm) en face d'un plan. Ce système d'électrodes permet de créer un champ très intense (plusieurs MV/cm) avec une tension modérée (quelques dizaines de kV). Le lieu de génération des streamers est limité au voisinage de la pointe et le risque de claquage est moindre. Ceci permet également d'étudier l'effet de la polarité, et de séparer les phases de génération et de propagation, ce que l'on ne peut pas réaliser en géométrie uniforme. De plus, l'apparition des streamers est plus reproductible et les résultats sont moins dispersés.

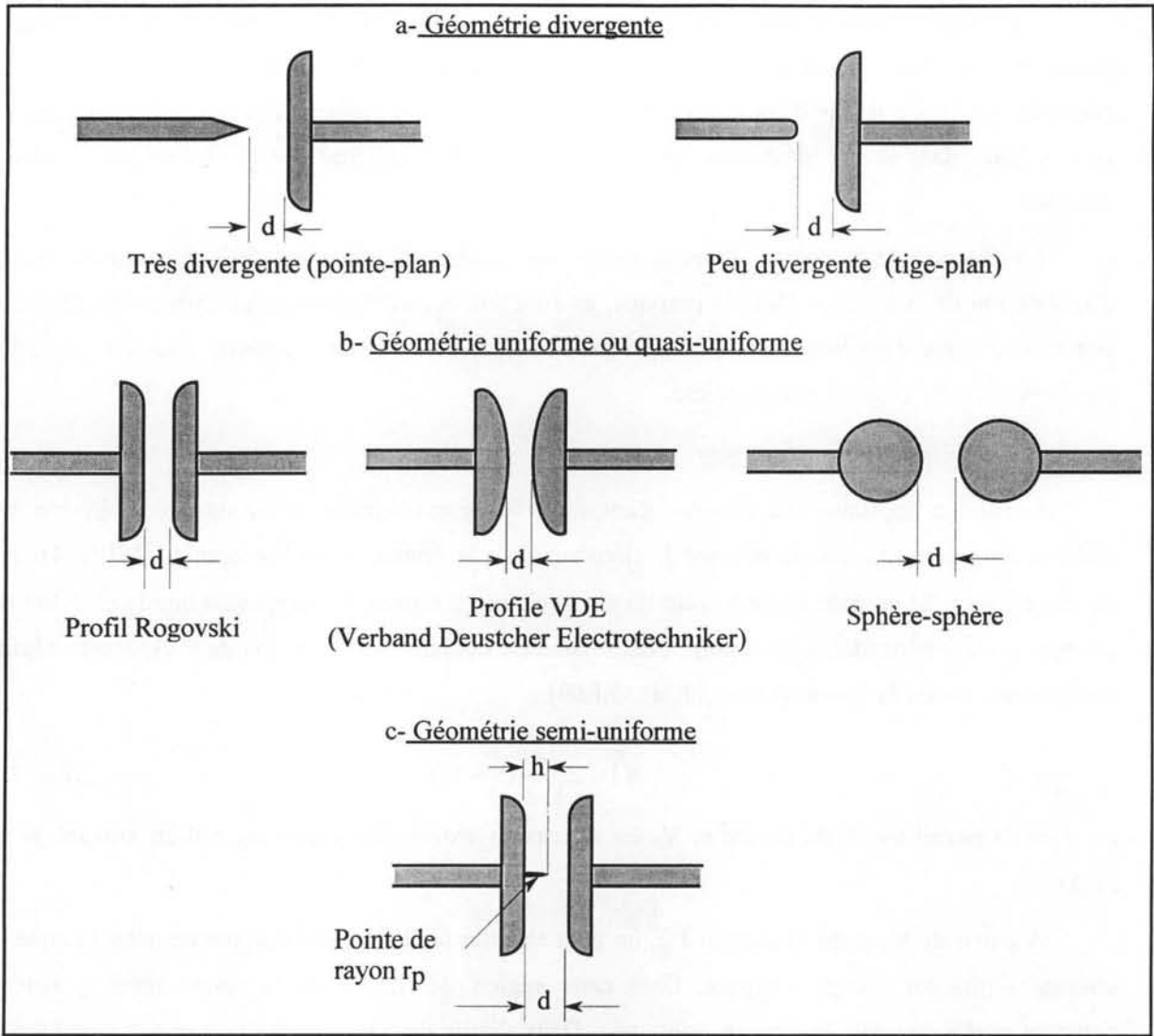


Figure 1.1: Différentes configurations d'électrodes utilisées pour étudier les streamers.

En supposant que le profil de la pointe est une hyperboloïde de révolution, Coelho et Debeau [COEL71] ont montré analytiquement que le champ à la distance x de la pointe est donnée par l'expression :

$$E(x) = \frac{2dV}{(2dx - x^2 + dr_p - xr_p) \ln\left(\frac{4d}{r_p}\right)} \quad (\text{Eq. 1.1})$$

où V est la tension appliquée; d et r_p sont respectivement la distance inter-électrodes et le rayon de courbure de la pointe.

Le champ maximal à l'extrémité de la pointe ($x=0$) est donné par :

$$E_s = E_{(x=0)} = \frac{2V}{r_p \ln\left(\frac{4d}{r_p}\right)} \quad (\text{Eq. 1.2})$$

En réalité, comme le plan est toujours de dimension finie et que les pointes ont rarement un profil hyperboloïdal, le champ réel peut être sensiblement différent de la valeur calculée par l'équation (1.2). De même dans la formule (1.1), le champ est supposé Laplacien, c'est-à-dire que l'on se place dans le cas idéal pour lequel il n'y a pas de modification du champ par la charge d'espace.

L'influence de la charge d'espace commence à être effective au delà d'un certain temps d'application de la tension. Dans la pratique, en fonction des conditions expérimentales (forme de la tension, durée d'application, rayon de l'électrode), la distribution de champ peut être modifiée par l'injection de charges par la pointe.

Tension continue

Lorsqu'on applique une tension d'amplitude progressivement croissante, on observe une tension seuil pour laquelle le courant I , circulant dans le liquide, croît rapidement [SIBI74]. Au-dessus du seuil, le courant devient contrôlé par la charge d'espace. En supposant que la mobilité des charges μ est indépendante du champ, l'expression du courant limité par charge d'espace en régime stationnaire est de la forme [COEL71, HALP69] :

$$\sqrt{I} = 2\sqrt{\frac{\epsilon\mu}{d}}(V - V_0) \quad (\text{Eq. 1.3})$$

où ϵ est la permittivité du liquide et V_0 est la tension extrapolée à courant nul en suivant la loi (1.3).

A partir de V_0 et de l'équation 1.2, on peut calculer le champ réel à la pointe dans la zone de courant limité par charge d'espace. Dans cette région, le champ sur la pointe reste quasiment constant quelle que soit la tension appliquée. Dans l'huile de transformateur, pour des pointes de rayon de 1 μm à 10 μm et différentes distances inter-électrodes, Lesaint [LESA87] a trouvé que le champ est limité à des valeurs de l'ordre de 6 MV/cm avec des pointes positives et de 3 MV/cm avec des pointes négatives.

Tension alternative

Sous tension alternative, il existe une injection bipolaire de charges d'espace et le temps de transit de charges est généralement beaucoup plus long que la période de la tension. Les charges modifient la distribution du champ de manière très complexe et le calcul du champ par la formule (1.1) n'est plus valable : le problème est pratiquement insoluble.

Tension impulsionnelle

Sous créneaux de tension, on peut obtenir un champ harmonique si l'injection de charges est négligeable pendant le temps de montée du créneau. Cependant, pour des pointes fines (environ 1 μm), un streamer lent peut être généré et se développer de manière significative sur le front du créneau, avant l'apparition d'un streamer filamentaire [GOUR94a]. Dans ce cas, la charge

rapidement injectée est suffisante pour affaiblir le champ sur la pointe, et par conséquent, augmenter la tension d'apparition des streamers filamenteux.

Afin d'éliminer l'effet des charges d'espace, l'étude de la génération des streamers en géométrie pointe-plan doit donc être réalisée sous crêneaux de tension avec un front très raide (de quelques dizaines de nanosecondes [GOUR94a]).

Malgré ces inconvénients, la géométrie pointe-plan reste la plus utilisée. Avec une pointe de quelques μm , le coefficient de renforcement du champ β (déterminé comme le rapport du champ maximum au champ moyen) dépasse quelques centaines et la géométrie pointe-plan est dite fortement divergente.

1.2.2 GEOMETRIE PEU DIVERGENTE (TIGE-PLAN)

La géométrie peu divergente (figure 1.1a), constituée d'une tige à extrémité hémisphérique (rayon de courbure du mm à quelques dizaines de mm) en face d'un plan, se caractérise par un coefficient de renforcement du champ β . La tige étant de grand rayon de courbure, le lieu d'apparition des streamers n'est plus prédéterminé comme dans le cas de la géométrie pointe-plan. Cela rend difficile la saisie des images de streamers par ombroscopie, surtout pour la détection des événements de taille très petite. La reproductibilité entre les expériences est plus faible. C'est pourquoi, il y a moins d'études rapportées dans cette configuration d'électrodes [RZAD79, IREQ95, LESA98a]. Pour cette géométrie, il n'y a pas de formule analytique de la distribution du champ, ce dernier pouvant être calculé numériquement.

1.2.3 GEOMETRIE UNIFORME OU QUASI-UNIFORME

Un tel champ est créé par des géométries constituées de deux électrodes planes ou de deux sphères sur une faible distance inter-électrodes (figure 1.1b). Ces géométries sont souvent employées dans les études du claquage des liquides (par exemple dans les essais normalisés [CEI156]). La localisation des phénomènes est aléatoire et leur visualisation est difficile. Il est pratiquement impossible de protéger les électrodes avec une barrière isolante parce que le risque de claquage reste grand. Ces difficultés rendent les études sur les streamers dans cette géométrie peu nombreuses [CROW54, THOM73, DEVI77, KELL81a, WONG82]. Pourtant, cette configuration représente un réel intérêt pratique, le champ étant en général peu divergent dans les applications.

1.2.4 GEOMETRIE SEMI-UNIFORME

Afin de surmonter ces problèmes et de pouvoir générer des streamers à des tensions relativement basses dans la configuration plan-plan, une petite pointe métallique peut être placée sur l'un des plans (figure 1.1c). La pointe joue le rôle d'électrode d'amorçage. Ce système d'électrodes a été utilisé et dénommé "semi-uniforme" par RZAD et al. [RZAD83], Massala et al.

[MASS97a] sous impulsions de tension et par Rain et al. [RAIN91, IREQ95] sous tension alternative.

Un autre aspect intéressant de cette géométrie est qu'elle permet de simuler le cas des streamers déclenchés par une aspérité (défauts de surface, particules). En faisant varier la taille de la pointe, cette géométrie offre la possibilité de comprendre comment une particule peut déclencher un streamer dans un champ uniforme, une situation souvent rencontrée dans le claquage sous tension alternative ou continue dans les applications.

Le facteur d'amplification du champ à l'extrémité d'un objet conducteur (aspérité, particule), posé sur une électrode en champ uniforme, dépend considérablement de la taille et de la forme de cet objet.

Pour un demi-ellipsoïde de révolution d'axes $2a$ et $2b$ ($a > b$), Félici [FELI66] a montré que le facteur β vaut :

$$\beta = \frac{c^3}{a \cdot b^2} \frac{1}{\ln\left(\frac{c+a}{b}\right) - \frac{c}{a}} \quad (\text{Eq. 1.4})$$

ou c est l'excentricité de l'ellipsoïde.

Si l'ellipsoïde est très allongé ($a \gg b$), alors $c \approx a$, il vient :

$$\beta \approx \frac{a^2}{b^2} \frac{1}{\ln \frac{2a}{b} - 1} \quad (\text{Eq. 1.5})$$

Vibrans [VIBR64] a, de plus, établi qu'une aspérité de géométrie simple (un cylindre de longueur h au bout hémisphérique de rayon r_p) renforce le champ par un facteur β :

$$\beta \approx \frac{h}{r_p} + 2 \quad (\text{Eq. 1.6})$$

La formule n'est valable que pour les faibles longueurs (ou hauteurs) de l'aspérité. Lorsque la longueur h n'est plus négligeable devant la distance inter-électrodes, Miller [MILL67] en introduisant un coefficient de correction, a montré que :

$$\beta = \beta_\infty \frac{d-h}{d} + \exp\left(-\frac{d-h}{h} \sqrt{\beta_\infty}\right) \approx \beta_\infty \frac{d-h}{d} = \beta_\infty \frac{L}{d} \quad (\text{Eq. 1.7})$$

$$\text{avec} \quad \beta_\infty = \frac{h}{r_p} + 2 + f\left(\frac{h}{r_p}\right) \quad (\text{Eq. 1.8})$$

où L et d sont respectivement les distances pointe-plan et plan-plan ($L = d - h$).

La formule (1.7) est valable pour $\frac{r_p}{h} \leq 0,2$ et $\frac{h}{d} < 0,5$

La fonction $f(h/r_p)$ varie de 0,18 pour $h/r_p = 2,5$ à 0,5 pour $h/r_p \rightarrow \infty$ [MILL67].

En règle générale, les modèles proposés sont appliqués uniquement pour les pointes de faible longueur ($h \ll d$).

Dans le cas général, le champ peut être calculé numériquement par simulation de charge. Dans nos travaux, le logiciel CSP (Charge Simulation Program) [LEVI93] a été utilisé.

1.3 PROPAGATION DES STREAMERS DANS LES LIQUIDES

Bien que la propagation ne soit pas le sujet essentiel de notre étude, il est nécessaire de rappeler quelques points importants concernant cette phase afin de comprendre le comportement complexe du streamer.

1.3.1 CARACTERES GENERAUX

Un streamer dans un liquide diélectrique est constitué d'un canal gazeux ionisé relativement conducteur généré soit sur l'anode (streamer positif) soit sur la cathode (streamer négatif).

A partir des résultats publiés, il est possible de dégager certaines caractéristiques générales des streamers dans les liquides relatives à leur aspects, leurs évolutions et leur effets :

- i) les streamers apparaissent toujours à *l'endroit où le champ est le plus renforcé*, par exemple, à l'extrémité d'une électrode pointue ou sur une particule métallique;
- ii) une fois générés, les streamers se propagent vers l'électrode opposée et peuvent s'arrêter à une distance plus ou moins longue selon les conditions expérimentales. Le claquage est produit quand le streamer touche le plan;
- iii) *leur indice optique de réfraction est inférieur à celui du milieu entouré* [FARA61, HAKI61, CHAD65]. D'une part, ceci permet leur visualisation par ombroscopie ou strioscopie et d'autre part cela rend très plausible l'hypothèse d'un changement de phase durant leur propagation;
- iv) ils émettent *de la lumière*, produisent *des ondes de choc* et *des courants transitoires* constitués soit d'une composante continue, soit de pics brefs, ou encore d'une composante continue sur laquelle sont superposées des impulsions brèves. L'intensité du courant (de quelques mA à plusieurs A) et celle de la lumière émise sont généralement corrélées [LIAO53, STEL66, USHA66, DENA88, WINT89, GOUR94a, LUND95, MASS97b];
- v) *les formes des streamers sont remarquablement variées*, soit en "buisson" constitué de quelques grosses branches aux contours très irréguliers, soit une forme ramifiée comprenant de nombreux filaments (figure 1.2). Un streamer filamentaire peut être plus ou moins ramifié selon le liquide, la géométrie d'électrodes, la tension appliquée [MORI72, YAMA77, CHAD80, DEVI81, CHAD88, BERO86, LESA88]. Le diamètre des filaments est compris entre quelques μm et quelques dizaines de μm ;

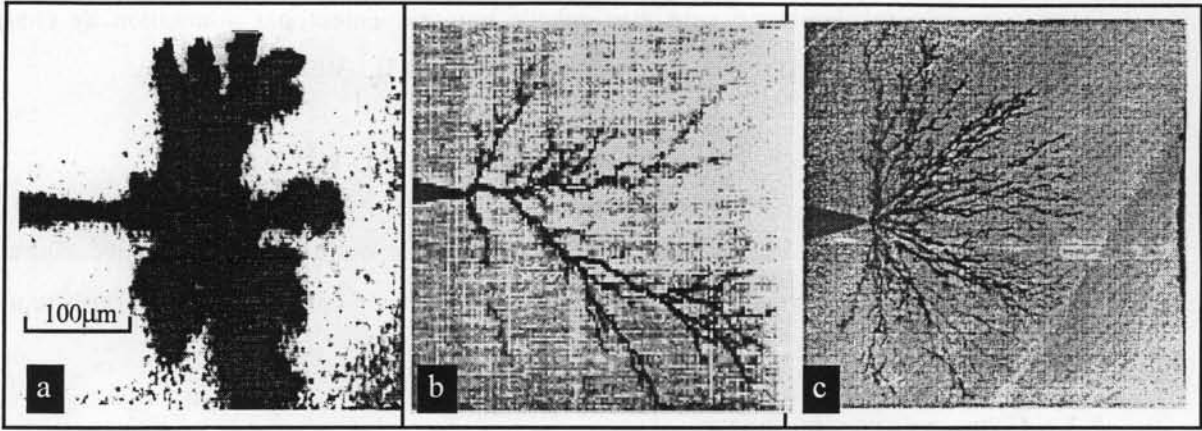


Figure 1.2: a) streamer positif "en buisson" dans le cyclohexane en géométrie pointe-plan sous créneau de tension ($r_p = 1,2\mu\text{m}$, $d = 1,8\text{ mm}$, $V = 12\text{ kV}$) [GOUR94a];

b) streamer positif filamentaire dans l'huile silicone visqueuse de 1000 cSt ($d = 3\text{ mm}$, $V = 22,5\text{ kV}$) [CHAD88];

c) streamer positif très ramifié dans l'huile de transformateur ($d = 3\text{ mm}$, $V = 22\text{ kV}$) [CHAD88].

- vi) les vitesses de propagation varient largement selon les conditions expérimentales : de quelques dizaines de m/s à presque 1000 km/s. En règle générale, dans les mêmes conditions, les streamers positifs se propagent plus vite et plus loin que les streamers négatifs, ce qui les rend plus dangereux. C'est pourquoi, ils sont étudiés de manière plus systématique;
- vii) qualitativement, il existe une corrélation entre la forme des streamers et leur vitesse : quelle que soit la polarité, les streamers de faible vitesse (quelques centaines de m/s) ont une forme touffue en buisson (figure 1.2a) et sont qualifiés de "subsoniques" (par rapport à la vitesse du son proche de 1 km/s dans les liquides). Plus les filaments des streamers sont fins, plus ils sont rapides. Les streamers filamentaires se propagent toujours à des vitesses supersoniques;
- viii) la vitesse des streamers croît avec la tension. Lorsque la tension appliquée augmente progressivement, différents modes de propagation des streamers ont été observés avec une vitesse de propagation de plus en plus rapide. Lors du passage d'un régime à l'autre, il y a une transition soudaine de la vitesse [DEVI81, HEBN88, MASS97b]. Hebner a proposé une classification fondée sur la vitesse, qui distingue 4 modes de streamers négatifs et 3 modes de streamers positifs [HEBN88]. Dans l'huile de transformateur, un 4^e mode de streamers positifs avec une vitesse dépassant 100 km/s a été observé [LESA96, MASS98];

- ix) en géométrie divergente et au-dessous de la tension de claquage, *les streamers s'arrêtent à une certaine distance (longueur d'arrêt)*, qui est fonction de l'amplitude de la tension, du liquide et de la pression;
- x) une pression hydrostatique de quelques bars suffit à limiter le développement des streamers lents. Cependant l'impact de la pression est moindre sur les streamers filamenteux (plusieurs dizaines de bars pour obtenir un effet comparable).

1.3.2 MECANISMES DE PROPAGATION

Pour les deux polarités, les deux types de streamers buisson lent et rapide filamenteux ont été observés avec un aspect similaire.

1.3.2.1 Streamers lents en buisson.

Les streamers lents (quelques centaines de m/s), quelle que soit la polarité, présentent toujours une forme massive (en buisson). L'étude par spectroscopie de la lumière émise dans des hydrocarbures a montré qu'ils se composent essentiellement de gaz de faible densité : les différents pics sur les spectres sont attribués, selon les longueurs d'ondes, à l'hydrogène atomique ou moléculaire et au carbone [SAKA80, WONG82, BERO88, DENA98].

La formation et l'apparition d'une cavité gazeuse (bulle), l'expansion de la cavité, la transition de la cavité en streamer et la propagation du streamer vers l'électrode opposée ont été caractérisées (voir plus loin au § 1.4). L'augmentation de la pression hydrostatique entrave la propagation des streamers lents et peut empêcher leur apparition. En dessous de la tension de claquage, les streamers en buisson s'arrêtent à une distance qui dépend de l'amplitude de la tension, du liquide et de la pression. Ils se désagrègent ensuite en bulles qui disparaissent rapidement dans le liquide.

Watson et al. [WATS85, WATS90, WATS93, SHAR78] ont montré qu'en considérant la bulle comme une sphère conductrice, la pression électrostatique sur l'interface bulle-liquide est donnée par $P_e = (1/2)\epsilon E^2$, où E est le champ électrique sur la surface de la bulle, et ϵ est la permittivité du liquide. Ils obtiennent alors une vitesse de propagation qui s'écrit :

$$v = \left[\sqrt{\pi} \frac{\epsilon \epsilon_0 V^2}{4\rho(\eta l R_m d)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (\text{Eq. 1.9})$$

où ρ et η sont la masse volumique et la viscosité du liquide; R_m et l sont le rayon de la cavité et la longueur du streamer.

Trouvant dans certaines conditions un accord convenable entre la vitesse calculée et mesurée, on peut conclure que la pression électrostatique intervient dans la propagation des streamers en plus de la vaporisation du liquide.

1.3.2.2 *Streamers filamenteux*

Les streamers positifs filamenteux ont été étudiés pour la grande majorité des liquides sous impulsions de tension [DEVI76, RZAD79, CHAD80, DEVI81, McKE84, BERO86, GOUR94a, MASS95, LESA96], et sous tension alternative [LESA87, LESA88, LESA98a]. Selon la nature du liquide et la tension appliquée, les streamers sont composés d'un nombre plus ou moins important de filaments, pouvant être plus ou moins ramifiés. Des streamers négatifs filamenteux ont également été observés sous certaines conditions : lors de fortes surtensions [DEVI81, LINH94, TORS95], dans les liquides halogénés [SAKA80] ou avec des additifs à bas potentiel d'ionisation [DEVI81, BERO87].

L'étude de la dynamique des canaux de streamers et du rôle de la pression (de 1 à 100 bars) a permis de mettre en évidence qu'ils sont constitués de vapeur de liquide générée par l'injection soudaine d'une forte densité d'énergie à l'extrémité des filaments. La puissance thermique dispersée à l'extrémité du streamer a été évaluée à 10 W [GOUR94a]. En arrière de cette extrémité se produit une phase d'expansion du filament pendant laquelle la pression interne décroît. Ensuite, une phase d'implosion conduit à la coupure des filaments en un "chapelet" de bulles [GOUR94a]. Lorsque la pression hydrostatique augmente, la longueur d'arrêt des streamers positifs filamenteux est considérablement réduite [LESA94a]. A forte pression (> 7 MPa), on observe la disparition des streamers filamenteux [FITZ90, GOUR93].

Pour se propager, les filaments doivent être nécessairement conducteurs. La preuve de la grande conductibilité des streamers filamenteux a été démontrée par l'effet Kerr dans le nitrobenzène [KELL81b] et par l'étude du courant transitoire et de la charge dans quelques liquides non polaires [LESA91, MASS97b]. Pour expliquer l'arrêt des streamers, il a été montré qu'il existe une chute de tension dans le canal des streamers (quelques dizaines de kV par cm). Dans l'huile de transformateur et à la tension de claquage, cette chute de tension est proche de 20 kV/cm pour un intervalle d'huile de quelques centimètres, et inférieur à 10 kV/cm pour des intervalles de plusieurs dizaines de centimètres [IREQ95, LESA98b]. En présence de surtensions, les streamers sont plus rapides et la chute de tension décroît jusqu'à quelques kV/cm [MASS98, LESA98b].

Pour expliquer la propagation des streamers filamenteux, Chadband et al. [CHAD65, CHAD80, CHAD88] et Devins et al. [DEVI81, DEVI76] ont proposé l'existence d'un mécanisme d'injection de charge par l'ionisation de champ à l'extrémité des filaments.

Il est également probable qu'un mécanisme de multiplication électronique en phase liquide existe en ces endroits (voir § 1.4.2).

1.4 GENERATION DES STREAMERS SOUS TENSION CONTINUE ET IMPULSIONNELLE

La génération des streamers est une phase importante puisqu'elle est à l'origine des événements observés et leur étude permet de progresser dans la compréhension des processus fondamentaux conduisant au claquage. En champ divergent impulsionnel, les streamers apparaissent parfois à la pointe avec un certain retard par rapport à l'application du créneau de tension. Ce temps t_i "statistique" correspondant à la génération est supposé représenter la durée pendant laquelle s'établissent les conditions nécessaires pour qu'un streamer apparaisse.

Pendant le temps t_i , différents phénomènes électriques, optiques et hydrodynamiques peuvent se manifester simultanément ou successivement. Compte-tenu des difficultés expérimentales telles que la durée extrêmement courte, la taille très petite des streamers, il n'existe sur le plan expérimental que très peu d'informations sur la phase de génération.

Récemment, les études réalisées au LEMD en géométrie pointe-plan ont montré que les conditions de génération des streamers dépendent considérablement du mode opératoire (forme de la tension, polarité, géométrie d'électrodes).

Les études dans les liquides très purifiés ont permis de clarifier les conditions dans lesquelles certains mécanismes tels que la multiplication et le transport de porteurs de charges pouvaient être observés.

Dans le cas de pointes de très faible rayon de courbure ($r_p \leq 0,3 \mu\text{m}$), les lois d'émission de champ en pointe négative et d'ionisation de champ en polarité positive selon les modèles de Halpern et Gomer [HALP69] expliquent bien les caractéristiques courant-tension dans certains gaz liquéfiés et quelques hydrocarbures [HALPE69, DOTO78, SCHM84, DENA87, DENA88, KATT89, HAID91, KATT91a]. Ces mécanismes sont observés au delà d'un seuil proche de 20 MV/cm. Les courants associés sont stables, dénués de pics, quelles que soient la pression et la polarité. Au-dessus de ce seuil, le courant est limité par la charge d'espace. La génération de bulles ou de streamers n'a pas été observée.

1.4.1 GENERATION DES STREAMERS NEGATIFS EN GEOMETRIE POINTE-PLAN SOUS TENSION CONTINUE

Pour les pointes de rayon de courbure r_p compris entre $0,5 \mu\text{m}$ et $10 \mu\text{m}$, Denat et al. [DENA88] ont montré que les phénomènes sont sensiblement différents : les signaux de courant sont constitués d'impulsions conduisant à la génération de bulles de gaz et de streamers.

1.4.1.1 Génération de bulles

L'apparition de bulles dans les liquides sous champ très élevé a été observée dans les liquides cryogéniques par Sibillot et Coelho [SIBI74], dans les hydrocarbures par Denat et al. [DENA87, DENA88, KATT89, KATT91a, KATT91b], par Striclett et al. [STRI90], par Yamazawa et al. [YAMA93], et dans l'huile de transformateur par Lesaint [LESA87]. La bulle constitue la première étape de génération des streamers négatifs.

En polarité négative et sous tension continue, on obtient un régime d'impulsions de courant très régulier en fréquence et en amplitude lorsque la tension est supérieure à une valeur seuil V_s indépendante de la pression jusqu'à 12 MPa, (figure 1.3) correspondant à un champ sur la pointe de l'ordre de 7 MV/cm dans le cyclohexane, le pentane ou le décane [DENA87, DENA88].

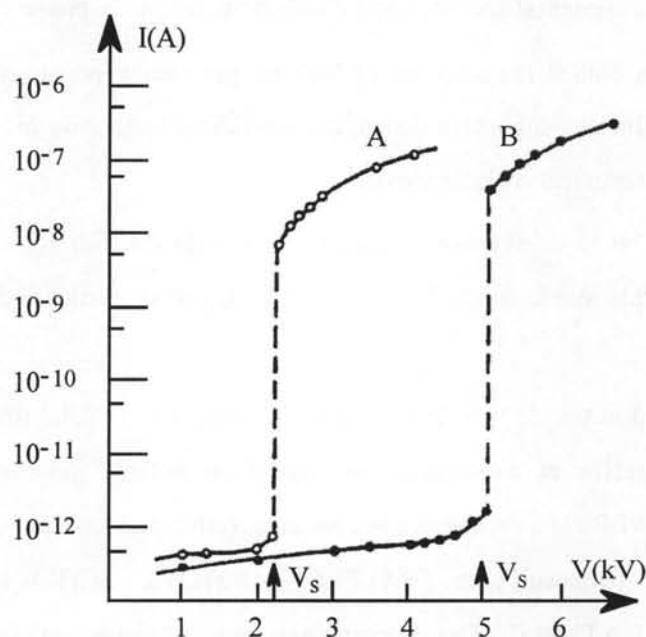


Figure 1.3: Courbes de courant moyen en fonction de la tension appliquée dans le cyclohexane en polarité négative. Rayon de courbure de la pointe $1 \mu\text{m}$ (A) et $2 \mu\text{m}$ (B) [DENA88]

Dans le cyclohexane, le n-pentane, et le n-décane, Denat et al. ont obtenu les résultats suivants :

- i) le courant est constitué d'une composante continue sur laquelle se superposent des pics brefs (environ 4 ns) dont l'intensité est proportionnelle à r_p et dont la fréquence augmente avec la tension appliquée;

- ii) chaque impulsion de courant résulte d'une avalanche électronique en phase liquide. Une quantité de charge de 0,05 à 2 pC (qui ne dépend que de r_p) est injectée localement dans un volume très petit situé devant la pointe;
- iii) chaque impulsion de courant génère une bulle gazeuse. La bulle suit la même séquence d'événements : dilatation, implosion, rebond et disparition; des ondes de choc sont émises lors de la génération de la bulle et lors des rebonds successifs;
- iv) l'augmentation de la pression hydrostatique réduit le volume et la durée de vie de la bulle.

Le régime d'impulsions régulières de courant dans les hydrocarbures s'apparente au régime de Trichel observé dans l'air à pression atmosphérique. Les électrons primaires sont produits par émission de champ [HALP69] sous un champ critique E_i , puis ces électrons sont accélérés. A proximité de la pointe où $E > E_i$, la multiplication électronique par avalanche en phase liquide provoque le régime d'impulsions de courant. Pour produire une impulsion de courant, l'avalanche doit atteindre une taille critique [GOLD82]. Si le rayon $r_p \leq 0,6 \mu\text{m}$, la région d'ionisation est alors très courte et il ne peut y avoir de multiplication électronique, ce qui est en accord avec les résultats obtenus avec les pointes très fines par Denat et al. [DENA88]. La distance à partir de la pointe où la multiplication électronique est importante est de l'ordre du rayon de la pointe : à cette distance, il existe un champ critique $E_i \leq 2,5 \text{ MV/cm}$.

L'énergie (de 10^{-10} à 10^{-8} J) est dispersée dans un volume très localisé (de l'ordre de r_p^3) devant la pointe. Elle est convertie en majeure partie en chaleur produisant localement un échauffement intense. Cela met le liquide dans un état surcritique car la chaleur n'a pas de temps de diffuser par thermoconduction, et une bulle de gaz est générée systématiquement après chaque impulsion de courant [DENA88, KATT89, KATA91a, HAID90].

Dans les liquides de pureté technique, les courbes $I(V)$ diffèrent de celles obtenues dans les liquides ultrapurs. On n'observe ni champ seuil, ni régime régulier de pics de courant, mais plutôt des rafales de pics qui se succèdent rapidement. Le champ sur la pointe est modifié par le passage d'un courant de conduction (généralement limité par charges d'espace) dû à la présence d'impuretés qui affaiblit le champ.

1.4.1.2 Transition de la bulle en streamer négatif lent (en buisson)

Avec des pointes fines ($r_p \approx 1 \mu\text{m}$), lorsque la tension appliquée est proche du seuil de génération, il n'y a pas de phase de propagation. A tension plus élevée et avec des rayons plus importants de la pointe, les pics de courant uniques sont remplacés par des rafales de pics. La fréquence et l'amplitude des impulsions augmentent avec la tension. Ces impulsions de courant donnent naissance à une série de bulles, chaque nouvelle bulle apparaissant avant la disparition de la précédente.

Dans la phase initiale, une cavité gazeuse renfermant essentiellement de la vapeur est créée, ensuite des décharges se produisent à l'intérieur de cette cavité. Dans le gaz, la vitesse des électrons est largement supérieure à la vitesse de progression de la colonne gazeuse; ces électrons pénètrent donc rapidement dans le liquide et pourront à nouveau générer du gaz jusqu'à ce que le champ E_s dans le canal soit insuffisant pour entretenir la décharge : la propagation cesse alors.

Les décharges successives entraînent la création d'une quantité supplémentaire de gaz [KATT89] et provoquent l'allongement de la poche gazeuse. Le contour de la bulle se déforme et son volume augmente. L'allure des figures formées, les vitesses de propagation de 50 à 100 m/s sont celles des streamers en buisson [BERO87, LESA88].

1.4.2 GENERATION DES STREAMERS POSITIFS EN GEOMETRIE POINTE-PLAN

1.4.2.1 Tension continue

Sous tension continue, lorsque la pointe est de polarité positive, il n'y a ni champ seuil, ni accroissement net de courant, comme observé en polarité négative (figure 1.4).

Un régime erratique de pics de courant a été détecté dans le cyclohexane pour des champs dépassant 5 MV/cm. Cette valeur est trois fois inférieure à la valeur du champ d'ionisation suivant le modèle de Halpern et Gomer [HALP69].

La succession des événements conduisant à l'apparition d'une phase gazeuse a été clairement observée : la formation de bulles est consécutive aux pics de courant [DENA88]. Chaque impulsion de courant génère un volume de gaz aux contours irréguliers (de diamètre environ 50 μm) similaire à un petit streamer négatif. Une augmentation de la pression réduit sensiblement la durée du signal et modifie la forme du courant [DENA88]. Le caractère erratique du phénomène en polarité positive n'a pas permis d'effectuer une étude expérimentale systématique.

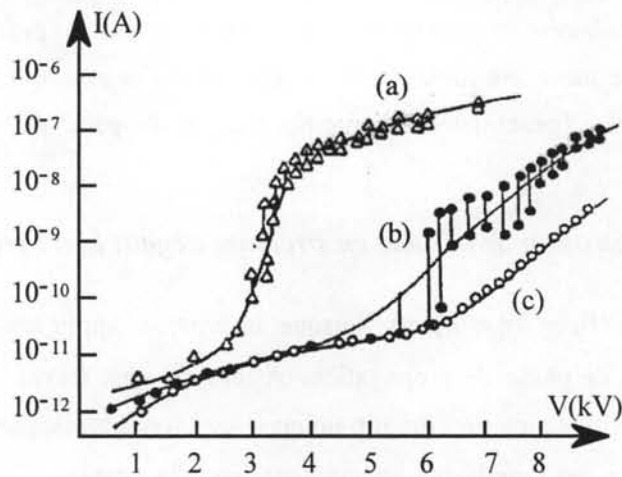


Figure 1.4: Courbes $I(V)$ dans le cyclohexane pur en polarité positive pour des pointes en tungstène a) $r_p = 1 \mu\text{m}$ et b) $r_p = 2 \mu\text{m}$ et c) pour une pointe en acier $r_p = 2 \mu\text{m}$ [DENA88].

On a attribué ce régime d'impulsions de courant à un processus de multiplication de charges par avalanches électroniques car la valeur du champ, pour lequel il a été observé, ne peut pas résulter d'un seul mécanisme d'ionisation de champ. Pour avoir la formation d'une avalanche, il faut que les électrons primaires soient produits à proximité d'une zone de champ intense sur une profondeur suffisante. Comme la pointe est de polarité positive, les électrons ne peuvent provenir que du liquide. Les molécules du liquide sont ionisées selon une loi d'ionisation de champ qui se caractérise par le passage des électrons de la bande de valence du liquide à la bande de conduction du métal par effet tunnel [HALP69].

1.4.2.2 Impulsion de tension : Travaux de Gournay et Lesaint

Une étude détaillée sur la génération des streamers positifs a été réalisée par Gournay et al. sous créneaux de tension en géométrie fortement divergente dans le cyclohexane et le pentane [LESA91, LESA94a, LESA94b, GOUR93, GOUR94a, GOUR94b]. Les conditions expérimentales ont été bien contrôlées : l'utilisation des créneaux de tension avec un temps de montée très rapide (≈ 20 ns) pour éviter la perturbation du champ par la charge d'espace.

Aux faibles distances inter-électrodes (quelques mm), les streamers lents en buisson ne sont observés que pour des pointes de rayon de courbure inférieur à un certain "rayon critique r_c " (figure 1.5). Ils sont générés à la tension V_g^+ qui croît avec r_p ; les streamers filamenteux apparaissent au-dessus d'une tension seuil constante V_f supérieure à V_g^+ .

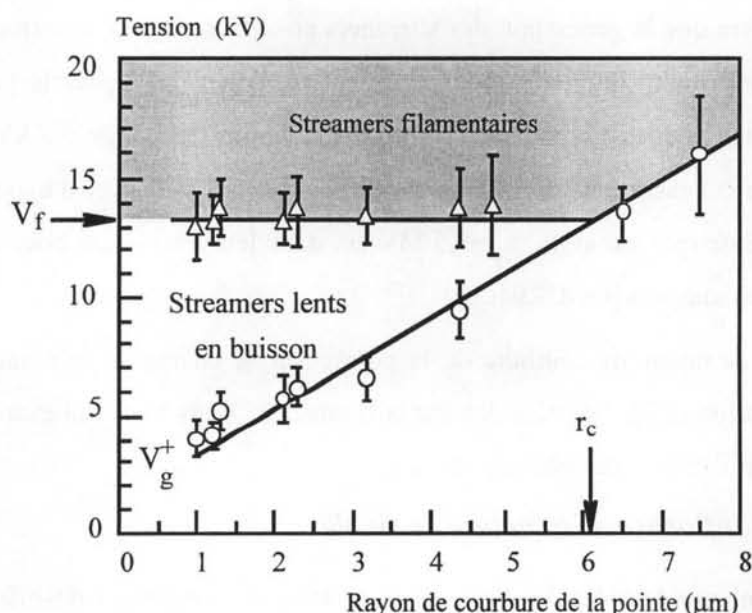


Figure 1.5: Tensions de génération V_g^+ et de seuil de propagation V_f des streamers positifs dans le cyclohexane en fonction du rayon de courbure de la pointe, distance pointe-plan $d=2,5$ mm [GOUR93].

Pour $r_p < r_c$, V_g^+ représente la tension de génération des streamers lents, V_f est la tension seuil de propagation des streamers filamenteux. V_g^+ croît lorsque le rayon de courbure de la pointe augmente. Quant à V_f , elle reste constante jusqu'à $r_p = r_c$.

Pour $r_p > r_c$, $V_g^+ > V_f$, seuls des streamers filamenteux sont observés. V_g^+ représente la continuation de la courbe de la tension de génération des streamers lents.

La variation de la tension d'apparition des streamers positifs avec le rayon de courbure de la pointe montre que leur génération dépend de la distribution du champ déterminée par le rayon de courbure de la pointe r_p . En revanche, la tension seuil de propagation V_f ne dépend que de la nature du liquide et faiblement de la distance inter-électrodes. Il a été proposé que lorsque la tension dépasse le seuil V_f , le champ E_f agissant sur "l'embryon" de streamer est tel qu'il se développe de manière instable sous la forme d'un filament qui se propage en recréant un champ élevé à son extrémité. Les filaments sont en effet de bons conducteurs et se comportent comme une extension de la pointe [KELL81b, LESA91]. Le champ E_f dépend de la tension appliquée, de la distance inter-électrodes et des propriétés des filaments (charge, forme) mais non du rayon de courbure de la pointe r_p . Si la tension appliquée n'est pas suffisamment élevée, le champ minimum de propagation n'est pas atteint, seuls des streamers lents en forme de "buisson" sont observés.

a) Influence de la distance inter-électrodes, du rayon de courbure

Il a été montré que la génération des streamers positifs dépend plus fortement du rayon r_p de la pointe que de la distance inter-électrodes. Pour r_p fixé, la tension V_g^+ varie peu avec la distance (dans le cyclohexane pour une pointe de $1,4 \mu\text{m}$, par exemple, de $5,5 \text{ kV}$ à 7 kV entre $d=1 \text{ mm}$ et $d=10 \text{ mm}$). Le calcul théorique de la tension d'apparition $V_g^+(d)$ avec l'hypothèse d'un champ constant sur la pointe (par exemple, $E_g=9,5 \text{ MV/cm}$ dans le cyclohexane pour cette pointe) est en bon accord avec les mesures [GOUR94a].

L'influence du rayon de courbure de la pointe sur le champ de génération des streamers, calculé avec l'équation (1.2), est présentée sur la figure 1.6. Dans le cyclohexane et le pentane, le champ d'apparition décroît sensiblement avec r_p .

b) Influence de la nature du liquide

Dans de nombreux liquides, le champ de génération des streamers positifs est compris entre 8 et 11 MV/cm pour le rayon de courbure $r_p \approx 1 \mu\text{m}$ [GOUR94a]. Le tableau 1.1 donne les tensions V_g^+ et V_f , ainsi que le champ de génération des streamers dans différents liquides et mélanges.

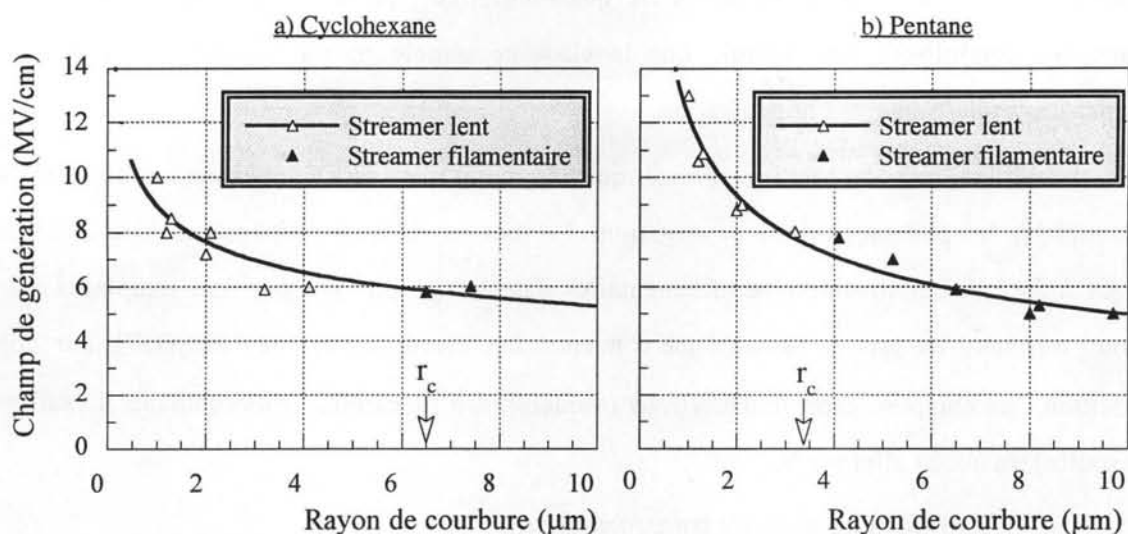


Figure 1.6: Champ de génération calculé avec les valeurs mesurées de V_g en fonction du rayon de courbure de la pointe dans le cyclohexane et dans le pentane d'après Gournay [GOUR94a].

Tableau 1.1: Tension de génération des streamers dans différents liquides pour $r_p = 1,2\mu\text{m}$ et $d = 1,6\text{ mm}$ [GOUR94a]

Liquides utilisés	Formule chimique	ϵ (20°C)	V_f kV	V_g kV	E_g MV/cm	Champ de claquage MV/cm [CROW54]
Cyclohexane	C_6H_{12}	2,0243	14,5	4,4	8,4	-
n-Decane	$C_{10}H_{22}$	1,980	11,3	4,9	9,4	1,92
Pentane	C_5H_{12}	1,8371	10,3	5,4	10,35	1,44
Cyclooctane	C_8H_{16}	2,116	9,2	5,3	10,15	
Huile blanche	Composé	2,2	8,8	5,3	10,15	-
Huile de transformateur	Composé	2,2	7,6	4,4	8,45	-
2.2.4-triméthylpentane	C_7H_{16}	1,902	7,4	5,6	10,7	1,4
2.3diméthylbutane	C_6H_{14}	1,888	7,3	5,7	10,9	1,38
2,2-diméthylbutane	C_6H_{14}	1,869	6,2	5,2	9,95	1,33
Cyclohexane + Pyrène (saturation à 20°C)	Composé		5,8	4,4	8,4	
Cyclohexane + 10% Tétrachlorure de carbone	-		13,2	4,1	7,85	

La structure moléculaire du liquide joue un rôle significatif sur la génération et la propagation des streamers. La classification des liquides suivant les valeurs de V_f est identique à

celle des champs de claquage en géométrie quasi-uniforme (sphère-sphère) aux faibles distances. Dans ces conditions, cela signifie que le claquage semble paradoxalement contrôlé par la propagation plutôt que par la génération.

L'addition de composés polyaromatiques (pyrène) dans le cyclohexane modifie de façon remarquable les phénomènes de propagation. La tension seuil de propagation V_f est réduite de 14 kV à 5,8 kV. Les streamers peu filamenteux dans le cyclohexane pur sont remplacés par une forme très ramifiée lors de l'ajout d'une concentration élevée de pyrène [JUNG97]. Par contre, l'addition d'un composé capteur d'électrons (tétrachlorure de carbone, chloroéthane, hexafluorure de soufre) n'a aucun effet sur V_f .

c) Cas de l'huile de transformateur

Les phénomènes de streamers dans l'huile minérale sont sensiblement influencés par la présence des molécules aromatiques, qui peuvent représenter jusqu'à 30 % de la composition de ces huiles [DEVI81]. Les composés aromatiques possèdent à la fois une grande capacité à piéger les électrons et un bas potentiel d'ionisation, et l'on observe, dans les deux polarités, des comportements caractéristiques de tels additifs.

1.4.3 GENERATION DES STREAMERS DANS DES GEOMETRIES DIFFERENTES

Les études de la génération des streamers ont été réalisées en majorité en géométrie fortement divergente (pointe-plan) comme il a été montré au paragraphe précédent. Les travaux réalisés dans d'autres géométries sont beaucoup moins nombreux. Dans ce paragraphe, nous analysons le rôle joué par la configuration d'électrodes.

1.4.3.1 Champ peu divergent (tiges arrondies)

Rzad et al. [RZAD79] ont effectué l'étude de la génération et de la propagation des streamers dans les huiles isolantes en utilisant la géométrie tige-plan. Les tiges à extrémité hémisphérique de rayon r_p de 0,5 mm à 2,52 cm sont séparés d'un plan à une distance fixe ($d=0,318$ cm). Le coefficient de renforcement du champ β 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 figure 1.7.

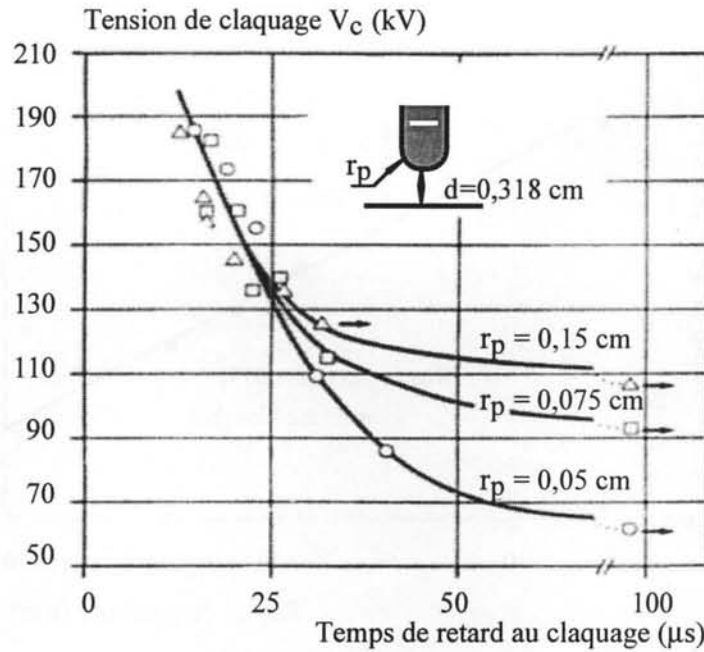


Figure 1.7: Temps de retard au claquage en géométrie tige-plan, polarité négative [RZAD79].

- aux fortes tensions (>130 kV), le temps de retard au claquage est pratiquement indépendant de r_p ; il correspond au temps de propagation;
- plus les tensions sont faibles et les valeurs de r_p grandes, plus le temps de retard au claquage augmente. Ceci est dû à l'existence d'un temps de retard à la génération qui augmente quand le champ diminue.

Pour les streamers positifs, en raison de la rapidité des streamers filamenteux, aucune étude comparative n'a été faite.

Ces auteurs [RZAD79] ont montré que les champs d'apparition des streamers dans ces conditions, sont divisés par un facteur 3 quand le rayon de courbure passe de 0,5 mm à 2,52 mm (figure 1.8). Sur cette figure, nous avons rapporté également les champs de génération des streamers positifs obtenus par Gournay en champ très divergent (voir figure 1.6) [GOUR93]. 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.

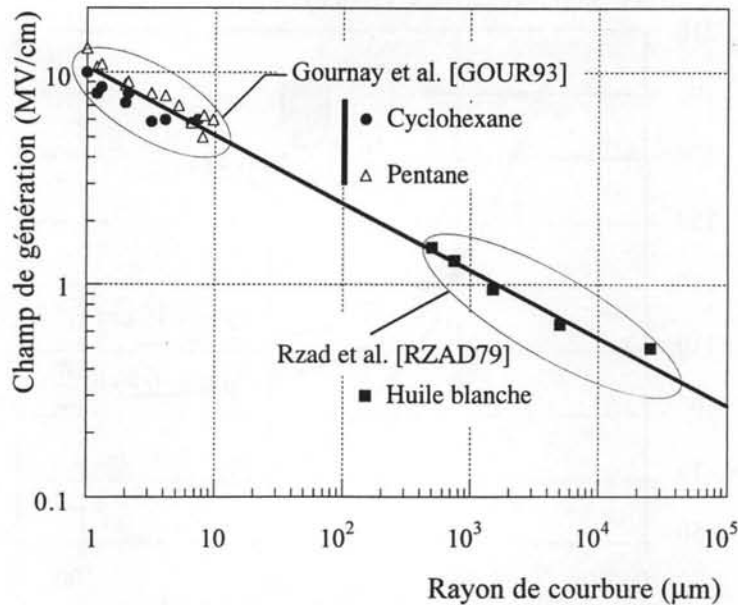


Figure 1.8: Champ de génération des streamers négatifs en fonction du rayon de courbure de l'électrode en géométrie tige-plan dans l'huile blanche d'après Rzad et al. [RZAD79] et en positif en géométrie pointe-plan dans les hydrocarbures par Gournay [GOUR93].

La diminution du champ de génération des streamers lorsque le rayon de courbure de l'électrode augmente, peut être comparée à celui 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. Cet effet est connu depuis longtemps sous le nom "d'effet de volume" [WILS55, TRIN82]. Une telle dépendance est probablement due à la présence des défauts (particules, aspérités) sur les électrodes (voir §1.6).

1.4.3.2 Champ uniforme ou quasi-uniforme

Il n'existe que très peu d'observations expérimentales concernant les phénomènes prédisruptifs en géométrie uniforme (électrodes planes) ou quasi uniforme (électrodes sphériques). De manière générale, on constate que les streamers sont générés en des lieux répartis aléatoirement, soit sur la cathode, soit sur l'anode. Les résultats publiés permettent d'aboutir aux conclusions suivantes :

- i) il apparaît dans un premier temps de multiples streamers en forme de buisson générés sur la cathode [THOM73, DEVI77, FORS80, WONG82]; ils se propagent lentement sur de courtes distances;
- ii) le claquage semble être produit par un second streamer très rapide généré sur l'anode. La forme et la vitesse de celui-ci sont mal décrites : la vitesse est qualitativement

semblable à celle mesurée en géométrie pointe-plan (quelques km/s à plusieurs dizaines de km/s). La forme des streamers est masquée par l'arc électrique.

Ni la génération, ni la propagation n'ont été précisément caractérisées. En général, on suppose que certains facteurs facilitent la génération des streamers en géométrie uniforme :

- i) le renforcement local de champ sur une des électrodes par des aspérités ou par des particules;
- ii) l'échange d'électrons aux électrodes comme le cas du vide : par exemple, sur la cathode certains sites pourraient posséder un travail de sortie plus bas;
- iii) l'existence de cavités gazeuses au voisinage des surfaces des solides et l'apparition des décharges dans ces cavités est possible au contact des électrodes.

De plus, il existe un certain nombre de données expérimentales concernant le claquage sous tension impulsionnelle de durée brève (quelques microsecondes) de liquides bien filtrés sur des distances très faibles (dizaines de μm). Dans ces conditions, des rigidités de plusieurs MV/cm ont été mesurées [CROW54, SHAR78]. En géométrie divergente, un champ moyen de quelques dizaines de kV/cm suffit à assurer la propagation des streamers. On considère généralement qu'un streamer généré peut donc se propager facilement et conduire au claquage, ce dernier étant contrôlé par la phase de génération. Cette conclusion est contradictoire avec les observations de Gournay : la rigidité des liquides sous tension impulsionnelle est d'autant plus élevée que la tension seuil de propagation V_f est grande [GOUR94a] (voir le tableau 1.1). Ceci semble montrer que le claquage est contrôlé par la propagation.

En géométrie plan-plan, la distance entre les électrodes joue également un rôle important. La rigidité décroît de plus de 2 ordres de grandeur quand cette distance est augmentée jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres. Des grands intervalles impliquent des grandes surfaces d'électrodes et des grands volumes de liquide, ce qui diminue le champ de claquage (voir §1.6).

1.4.3.3 Géométrie semi-uniforme

En géométrie semi-uniforme et sous tension impulsionnelle, il a été montré que les streamers apparaissent avec les caractéristiques générales décrites précédemment (§1.2) mais avec quelques caractéristiques particulières :

- i- les streamers sont moins ramifiés par rapport à la géométrie pointe-plan;
- ii- le développement des streamers est plus orienté dans la direction des lignes du champ.

Pour étudier les streamers dans l'huile de transformateur, Rzad et al. [RZAD83] ont pour la première fois utilisé la géométrie semi-uniforme constituée de deux plans avec une pointe de rayon de courbure $r_p=3 \mu\text{m}$, émergeant d'une longueur de 4 mm de la surface d'une des électrodes.

Avec cette configuration, les auteurs ont montré que la tension d'apparition des streamers est plus élevée que la tension minimale pour la propagation. Les résultats de mesure de la tension minimale de propagation en géométrie semi-uniforme et pointe-plan en fonction de la distance inter-électrodes sont présentés sur la figure 1.9.

Pour les faibles distances inter-électrodes, il y a peu de différence entre les deux géométries, mais à grande distance, la tension minimale de propagation en géométrie semi-uniforme est nettement supérieure à celle mesurée avec la même pointe sans le plan. On voit que la présence du plan rend la propagation des streamers plus difficile.

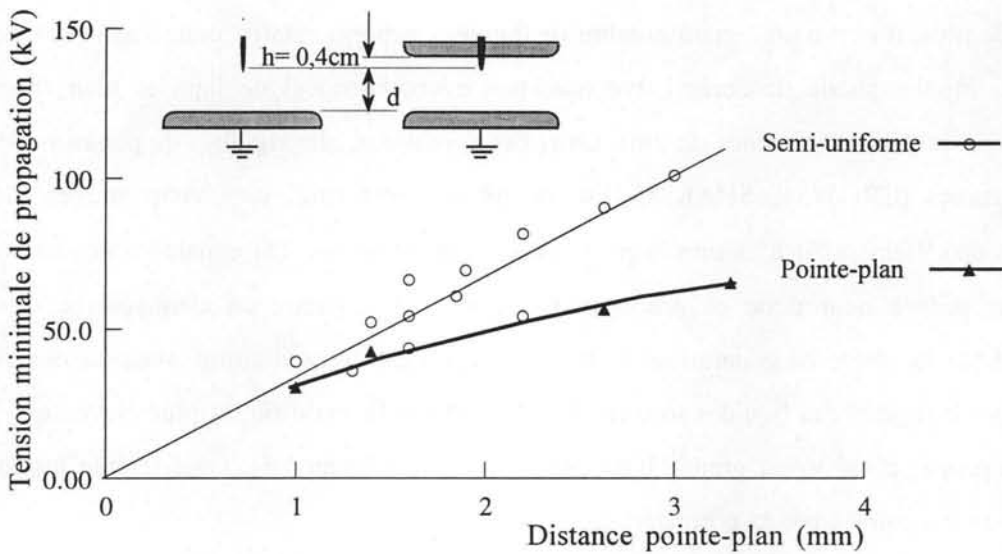


Figure 1.9: Tension minimale pour la propagation des streamers positifs dans l'huile de transformateur [RZAD83].

Des conclusions identiques ont été obtenues dans l'huile de transformateur par Rain [RAIN91] sous tension alternative et par Carraz [CARR95] sous tension impulsionnelle. Rain a observé que selon la longueur de la pointe, le comportement des streamers est analogue soit à celui de la géométrie pointe-plan, soit à celui de la géométrie uniforme.

De plus, il a été montré que dans cette géométrie, la propagation des streamers devient plus difficile [MASS97b].

Il a donc été établi qu'une grande aspérité sur la surface des électrodes renforce le champ mais les conditions pour lesquelles ce renforcement peut déclencher des streamers dans les liquides sont encore mal connues.

Bilan sur la génération des streamers sous tension impulsionnelle

Les travaux concernant la génération des streamers que nous venons de présenter ont été effectués dans des conditions expérimentales strictement contrôlées (champ harmonique, pas de charges d'espace). La plupart d'entre eux ont été réalisés en géométrie très divergente pointe-plan.

Cependant, les informations sur la génération des streamers avec cette géométrie n'apportent pas de réponse sur les conditions d'apparition des décharges dans les conditions typiques des applications (grandes électrodes, champ peu divergent, présence de particules, tension alternative).

Le champ de génération des streamers décroît beaucoup lorsque le rayon de courbure de l'électrode augmente (figure 1.8). Cette décroissance a été observée dans un nombre d'expérience limité et les raisons de cette diminution ne sont pas clairement établies.

Dans notre travail de thèse, nous réaliserons une étude systématique du champ de génération des streamers dans les deux polarités sous impulsions de tension et avec une grande gamme de rayons d'électrodes (du micromètre jusqu'à la dizaine de mm).

Les expériences de Rzad et al. (figure 1.9) et de Rain montrent que les conditions de génération et de propagation des streamers en géométrie semi-uniforme sont différentes de celles en géométrie pointe-plan. Une question reste ouverte : quelles sont les conditions d'apparition et de propagation des streamers en géométrie uniforme?

Nous étudierons la génération des streamers en utilisant la géométrie semi-uniforme dans le but de passer de manière continue de la géométrie pointe-plan (bien connue) jusqu'à la géométrie uniforme plan-plan (mal connue). Ceci sera fait avec des pointes de plus en plus petites. D'autre part, l'intérêt de la géométrie semi-uniforme est qu'elle permet de simuler l'apparition d'une décharge en géométrie uniforme déclenchée par la présence d'une particule métallique.

1.5 GENERATION DES STREAMERS SOUS TENSION ALTERNATIVE

1.5.1 PREAMBULE

Les travaux réalisés sous tension impulsionnelle et continue (§1.4) ne donnent pas de réponse pratique sur la génération des streamers dans les applications. Dans celles-ci, les champs employés sont peu divergents avec de grands volumes de liquide et la tension alternative est utilisée dans la majorité des cas.

Dans ces conditions, de nombreux effets liés à une longue durée d'application de la tension (injection de charges, mouvement des particules, mouvement électro-hydrodynamique du liquide...) sont des facteurs qui influencent fortement l'apparition des décharges. La plupart des travaux réalisés sous tension alternative sont des mesures de la tension de claquage, essentiellement dans l'huile de transformateur. L'étude de la génération des décharges a rarement été effectuée.

L'influence de certains paramètres sur la tension de claquage a été établie :

- effet de la durée d'application de la tension;
- effets d'échelle (distance, volume de liquide, surface d'électrode);
- influence des pollutions (particules, eau).

1.5.2 GENERATION DES STREAMERS EN GEOMETRIE DIVERGENTE

Sous tension alternative, une étude avec des distances inter-électrodes jusqu'à 2,5 cm a été réalisée dans l'huile de transformateur [LESA87, LEA88]. En géométrie pointe-plan avec des pointes de rayons de courbure compris entre 3 μm et 100 μm , il a été montré que les premiers événements sont observés au sommet des demi-alternances en pointe négative. La séquence d'apparition d'un streamer négatif est identique à celle observée par Denat et al. sous tension continue : génération d'une bulle à la pointe suivie d'une phase d'expansion.

En polarité positive, des streamers sont détectés à des seuils de tension légèrement supérieurs. Des streamers positifs filamenteux très semblables à ceux observés sous impulsions de tension ont été observés. Un régime de streamers positifs lents a été observé uniquement en géométrie très divergente ($r_p \leq 3 \mu\text{m}$) et à faible tension appliquée ($< 20 \text{ kV}$) comme sous impulsions de tension.

La fréquence d'apparition des streamers (nombre de décharges par minute) croît exponentiellement avec la tension appliquée (figure 1.10). La proportion relative des streamers des deux polarités se stabilise rapidement à un rapport 3 (trois fois plus de négatifs que de positifs).

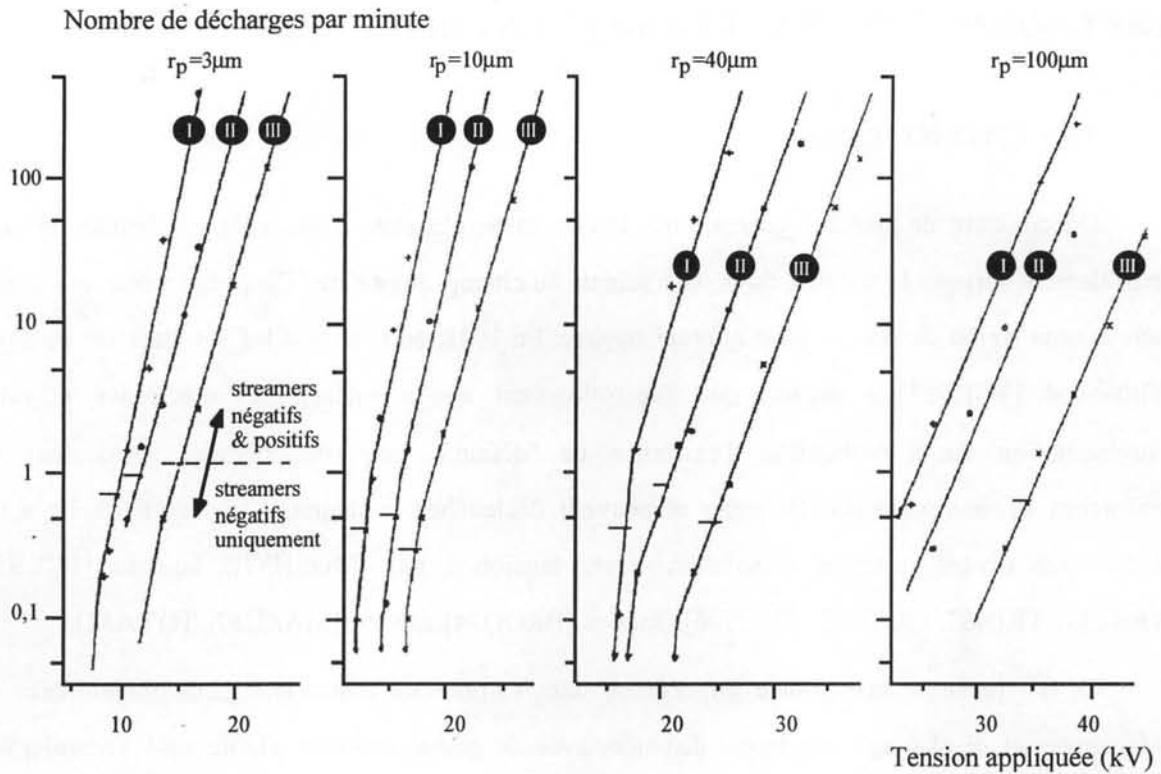


Figure 1.10: Fréquence d'apparition des streamers en fonction de la tension sous tension alternative (I : $d = 5$ mm; II : $d = 8$ mm; III : $d = 13$ mm) [LESA87]

Le champ de génération des streamers sous tension alternative calculé par la formule 1.2 décroît lorsque le rayon de courbure de la pointe croît, comme il a été observé sous tension impulsionnelle. Pour une fréquence de 10 décharges par minute, il décroît de 10 MV/cm à 1 MV/cm pour des rayons de 3 μm à 100 μm respectivement.

L'étude de la génération des streamers sous tension alternative a été étendue aux grands intervalles d'huile (jusqu'à 80 cm) et pour des électrodes de rayons plus importants (jusqu'à quelques mm) [RAIN91, RAIN94, IREQ95, LEA98a]. Les phénomènes observés sont semblables.

Lorsque le rayon r_p augmente, la fréquence d'apparition des streamers pour une tension donnée diminue et l'accroissement du nombre de décharges avec la tension devient moins rapide. Avec de grands rayons de courbure de la tige, l'apparition des streamers s'effectue, en général, de manière irrégulière sous forme de "rafales" [IREQ95]. Comme sous tension impulsionnelle, il a été observé que le champ d'apparition diminue lorsque le rayon r_p augmente.

1.6 CLAQUAGE EN CHAMP FAIBLEMENT DIVERGENT

1.6.1 EFFET D'ECHELLE

On constate de manière générale que le champ de claquage d'une isolation 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*. En 1928, en résumant les résultats sur ce sujet, Whitehead [WILS53] 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 sur les électrodes et peuvent déclencher le claquage. L'effet d'échelle a été étudié dans divers systèmes d'isolation haute tension : gaz [MOSH83], liquides [WILS53, WEBE57, TRIN82, GOSH95, SUEH96], solides [BROO74] et vide [MAZU87, TOYA81].

Ce fait présente une grande importance dans la pratique industrielle. Les phénomènes de préclaquage et de claquage aux grandes 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, par une simple extrapolation, au cas des grands systèmes réels.

1.6.1.1 Effet de volume

La figure 1.11 donne un exemple de l'effet du volume sous différentes formes de tension.

Les résultats obtenus par de nombreux auteurs [PALM69, NELS71, KAWA72] suivent une variation qui est généralement utilisée pour le dimensionnement des isolations dans la pratique industrielle [NELS89].

Pour expliquer cet effet, Wilson et al. [WILS53, WILS55] ont proposé une théorie supposant que le volume du liquide soumis à un champ électrique est le critère principal : le claquage prend naissance au point "le plus faible" (*weakest-spot*) du liquide. Si un plus grand volume est contraint au même niveau de champ, un point encore plus faible peut être présent conduisant au claquage à une tension plus basse (le champ de claquage diminue avec l'augmentation du volume du liquide). Wilson a établi une corrélation entre la rigidité et le volume contraint par l'application de la théorie *weak-link* en divisant le volume du liquide compris entre deux électrodes en n volumes élémentaires dont chacun a une probabilité de claquage finie.

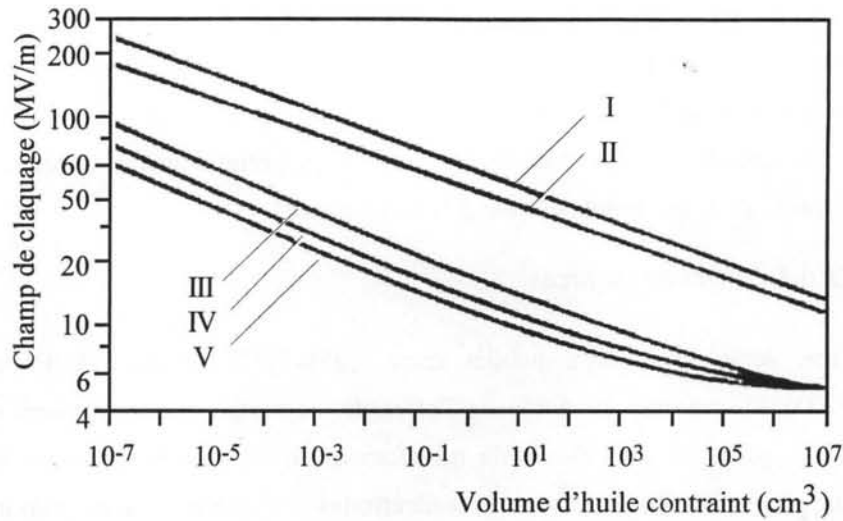


Figure 1.11: Effet du volume d'huile contraint sur la rigidité diélectrique d'une huile avec différentes formes de tension [KAKO86].

- I- onde de foudre;
- II- onde de manœuvre;
- III- rampe de tension alternative;
- IV- tension alternative maintenue pendant 1 minute;
- V- tension alternative maintenue pendant 30 minutes.

La probabilité de claquage d'un volume unitaire P_1 est reliée avec la contrainte appliquée E par une équation typique de la distribution Weibull de forme :

$$P_1 - 1 = 1 - \exp\left[-\frac{E}{E_1}\right]^m \quad (\text{Eq. 1.10})$$

où : E_1 : champ moyen de claquage du volume élémentaire;

m : paramètre de la distribution de Weibull.

La probabilité de claquage de tout le volume du liquide (n volumes élémentaires) P_n égale :

$$1 - P_n = (1 - P_1)^n \quad (\text{Eq. 1.11})$$

d'où :

$$P_n = 1 - \exp\left[-n\left(\frac{E}{E_1}\right)^m\right] \quad (\text{Eq. 1.12})$$

$$\log(E_n) = \log(E_1) - \frac{1}{m} \log(v) \quad (\text{Eq. 1.13})$$

v représente le volume contraint du liquide.

Les résultats obtenus par Wilson suivent une loi de puissance de la forme $E \propto v^{-0,14}$.

En géométrie non uniforme, l'effet est mesurable mais devient difficile à définir puisque le champ n'est pas partout identique. Wilson a proposé de considérer un volume équivalent de liquide autour duquel le champ soit suffisamment faible pour que la probabilité de claquage soit négligeable. Il est donc nécessaire de déterminer le volume du liquide ayant en champ uniforme la même

rigidité diélectrique que le champ maximal sur l'électrode de petit rayon de courbure en géométrie divergente. Ce volume est approximativement compris entre la surface de cette électrode et la surface où le champ vaut 90% du champ maximal (dit volume contraint à 90%). Cette méthode rend compte convenablement des mesures en géométrie sphérique ou cylindrique; les résultats sont moins satisfaisants pour les pointes (champ très divergent).

1.6.1.2 Effet de surface

Dans une série de travaux publiés entre 1956-1957, Weber et Endicott [WEBE56, WEBE57, ENDI57] ont mis en évidence l'effet dit de surface. Des mesures de la tension de claquage ont été réalisées dans l'huile de transformateur en champ uniforme avec des surfaces d'électrodes largement variées (distance inter-électrodes $d=1,9$ mm, surface maximale : 1500 cm^2 , rapport relatif de la surface de 1 à 400).

Ces auteurs ont suggéré que la dégradation de la rigidité diélectrique des grands volumes de liquide est principalement due à l'effet de surface qui suppose que plus la surface des électrodes est importante, plus la probabilité d'existence d'aspérités sur les électrodes l'est aussi. Basée sur une analyse statistique, cette théorie prévoit une dépendance linéaire de la rigidité diélectrique en champ uniforme avec le logarithme de la surface des électrodes. Dans l'huile, une réduction de 16% de la rigidité diélectrique a été observée lorsque la surface de l'électrode augmente d'un facteur 10. Des résultats similaires ont été présentés par d'autres auteurs [SIMO70, NEL571, KAWA72, TRIN82].

Le comptage des particules présentes dans les liquides montre que la probabilité de trouver de grandes particules croît quand le volume du liquide augmente [OOME83]. De plus la probabilité pour que de telles particules se trouvent près d'une électrode augmente avec l'aire des électrodes. Un streamer peut être généré lorsqu'une particule vient au contact d'une électrode (voir § 1.6.2) et ceci est d'autant plus facile que la particule est allongée et de grande taille. On comprend ainsi le rôle que peuvent jouer les particules dans les grands intervalles d'huile.

1.6.1.3 Travail de N. Giao Trinh et al.

Depuis les travaux de Wilson et Weber, le problème relié à l'effet d'échelle des électrodes a donné lieu à diverses controverses : certains auteurs ont soutenu l'explication sur l'effet de la surface proposée par Weber et Endicott, d'autres ont préféré la voie prise par Wilson.

Une étude étendue a été réalisée par N. Giao Trinh et al. [TRIN82] dans l'huile de transformateur avec différents niveaux de contamination. La rigidité diélectrique du liquide a été mesurée sous tension impulsionnelle et alternative entre deux plans parallèles en faisant largement varier les aires des électrodes (de 10^2 à $4,1.10^4 \text{ cm}^2$) et le volume du liquide (de 5 à $6,2.10^5 \text{ cm}^3$).

Cette étude montre que les effets de volume et de surface existent pour deux formes de tension. La variation relative du champ de claquage avec le volume ou la surface est comparable

pour les deux ondes de tension (voir également la figure 1.11). Dans les mêmes conditions, le champ de claquage sous impulsion de tension est toujours supérieur à celui sous tension alternative. La figure 1.12 montre les résultats de ces effets sous tension alternative.

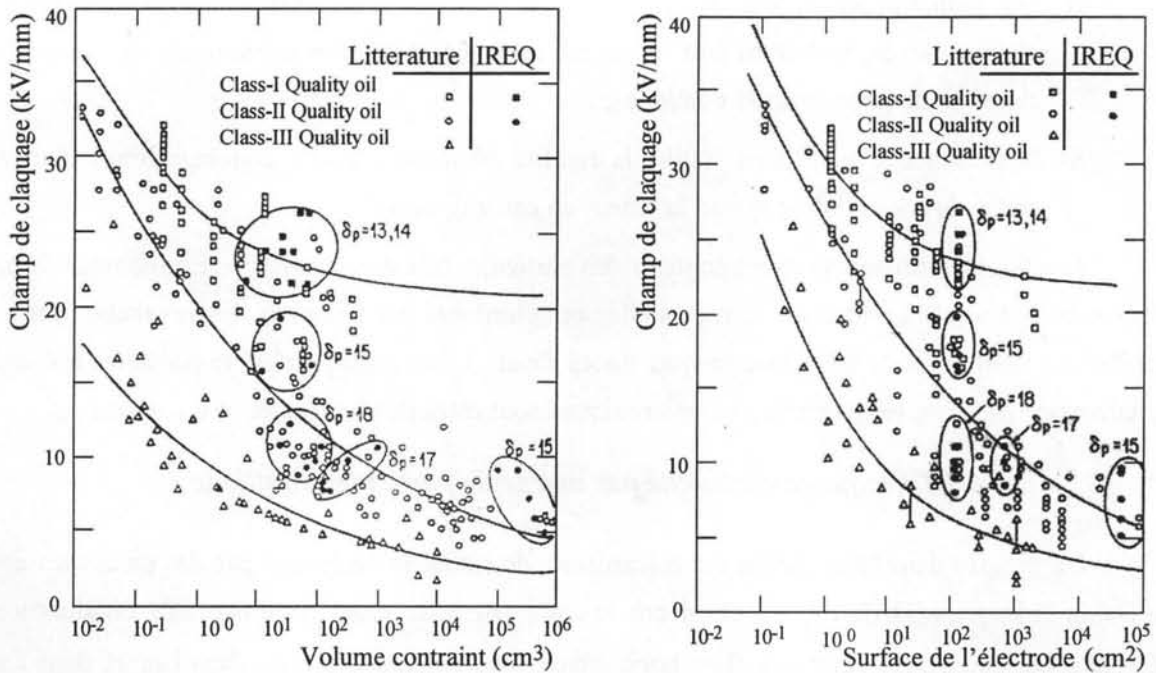


Figure 1.12: Effets de volume et de surface dans l'huile de transformateur sous tension alternative [TRIN82].

Sur cette figure, on voit que entre une huile très bien filtrée (indice de pollution $\delta_p=13,14$) et une huile très polluée ($\delta_p=18$), le champ de claquage varie de presque un facteur 2. Sous impulsions de tension, l'écart est beaucoup plus faible (environ 10%) et peu significatif compte tenu de la dispersion.

Cependant la dispersion des résultats est très grande, et en règle générale, il est impossible de séparer les influences relatives de la surface des électrodes ou de leur espacement puisque les variations de la rigidité qui sont observées en privilégiant l'un ou l'autre de ces facteurs, à volume constant ne sont pas significatives. Il semble néanmoins que l'effet de surface domine pour les liquides bien filtrés tandis qu'il y a une prédominance de l'effet du volume en présence de particules.

1.6.2 EFFET DES PARTICULES

De nombreux exemples de dégradation de la tension de claquage par la présence de particules dans l'huile sont rapportés, principalement par des mesures de la tension de claquage V_c en géométrie uniforme et pour des temps "longs" (sous tension alternative ou continue). Ainsi leur influence a pu être mise en évidence soit en filtrant l'huile, soit en ajoutant au liquide des

concentrations connues de particules [TRIN82, MINE82]. Les particules constituent un paramètre majeur affectant la rigidité électrique, qu'il s'agisse de liquides ou de gaz et le danger qu'elles représentent dépend fortement des facteurs suivants :

- i) leur nature et leur forme : les particules conductrices donnent lieu à des renforcements de champ élevés, surtout si leur forme est allongée et si elles constituent des "ponts" en s'agrégeant (sous tension continue);
- ii) la présence d'eau : dans l'huile, la rigidité décroît pour une concentration donnée de particules de cellulose quand la teneur en eau augmente.

Les liquides isolants peuvent contenir des particules très diverses par leur taille, leur forme et leur nature. De telles particules sont partiellement éliminées par filtration. En revanche, certaines pollutions (particules de taille micronique, traces d'eau...) sont pratiquement impossibles à éliminer totalement. De plus, les particules submicroniques sont difficiles à détecter et à compter.

1.6.2.1 Claquage déclenché par une seule particule métallique

Un progrès dans l'élucidation des mécanismes de claquage déclenché par des particules est dû à Dakin et Hughes [DAKI69]. Ils ont décrit le comportement d'une seule particule conductrice de forme sphérique placée entre des plans horizontaux sous tension continue dans l'air et dans l'huile minérale. Un champ modéré (≤ 10 kV/cm) est suffisant pour soulever une particule sphérique (aluminium ou acier de diamètre de 1 à 3 mm) et la déplacer d'une électrode à l'autre. Des microdécharges sont produites par la sphère à chaque approche d'une électrode. Dans le cas où la particule est libre, Dakin et Hughes ont mesuré une tension de claquage plus faible que dans le cas où elle est fixée sur une électrode. Les auteurs suggèrent que le claquage pourrait dépendre non seulement du renforcement de champ dû à la particule mais encore de l'effet des microdécharges.

Récemment, des travaux similaires ont été conduits dans l'huile minérale à partir de l'idée selon laquelle les claquages en champs peu divergent dans les grands intervalles d'huile pourraient être provoqués par une seule particule de taille suffisante [HARR75, BIRL76, TOBA96a]. Les microdécharges provoquées par une particule conductrice en contact avec une électrode, ont été mises en évidence par plusieurs auteurs [BIRL76, HARR75, BIRL93, RAIN92]. Dans le cas d'une bille de 3 mm de diamètre soumise à une tension continue de 22,5 kV, entre deux plans séparés d'une distance de 8,1 mm, les microdécharges apparaissent lorsque la particule est à 250 μ m de l'électrode [BIRL76]. Des expériences réalisées sous champ alternatif uniforme avec des particules filiformes de 2,5 mm de long et 1 mm de diamètre, provenant de matériaux aussi divers que le magnésium, le fer, le cuivre ou l'aluminium, ont permis de vérifier que les champs de soulèvement dépendaient de la masse volumique des particules. Une étude expérimentale et théorique a été réalisée par Tobazéon [TOBA96b] avec des particules sphériques et cylindriques. Ce travail a montré quantitativement les interactions électriques et mécaniques de la particule avec les électrodes. En mesurant et calculant la charge transférée dans les microdécharges, l'auteur a conclu

que celles-ci ne déclenchent pas d'elles-mêmes le claquage. C'est le renforcement du champ à l'extrémité de la particule se déchargeant rapidement sur une électrode qui est responsable de la génération des streamers et de la réduction de la tension de claquage.

Rain et Tobazéon [RAIN92] et Carraz et al. [CARR95] ont étudié la corrélation entre la tension de claquage et la dimension d'une particule métallique. Ils ont montré que pour deux plans parallèles distants de 3 mm, lorsque la particule s'approche de l'anode, un streamer positif prend naissance et déclenche le claquage. Le champ de claquage dépend des dimensions de la particule : sa longueur et son diamètre (figure 1.13). Le claquage a lieu pour des champs alternatifs très bas (quelques dizaines de kV/cm) avec une particule métallique allongée.

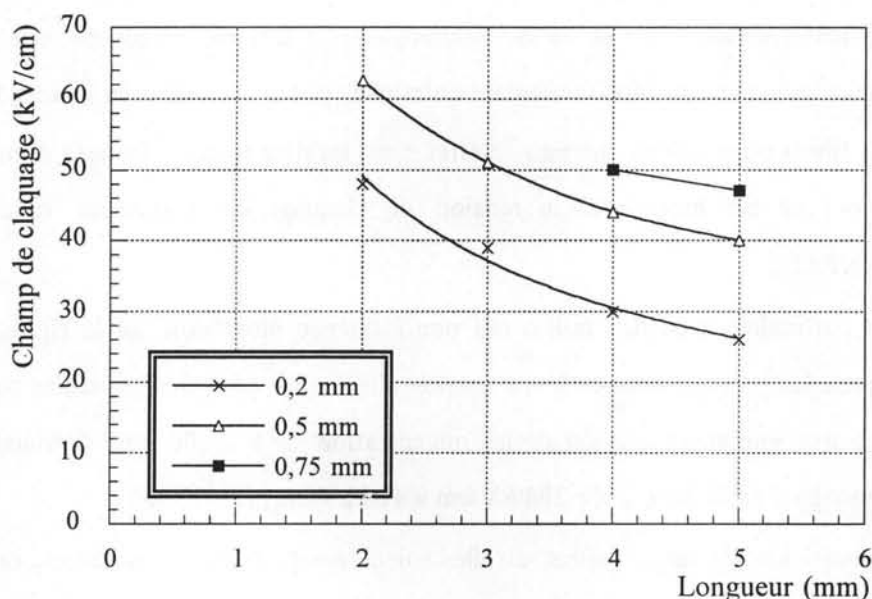


Figure 1.13: Influence de la taille d'une particule libre en acier de longueur h et de diamètre 0,2mm, 0,5mm et 0,75 mm sur la rigidité de l'huile de transformateur en champ uniforme alternatif (distance entre plans $d=3$ mm)[CARR95].

Le calcul du champ à l'extrémité de la particule avec l'expression 1.4 montre que le champ dépend principalement du diamètre de la particule : il est d'autant plus élevé que le diamètre de la particule est petit. Ces champs (compris entre 0,5 et 1 MV/cm) sont comparables à ceux obtenus avec des pointes ou des tiges dont le rayon de courbure excède $10 \mu\text{m}$ (voir §1.5).

Par ailleurs, la même particule fixée sur l'anode ne déclenche le claquage que pour des tensions dont l'amplitude est 2 fois plus élevée. L'influence de la microdécharge de durée extrêmement brève est donc déterminante [TOBA96b].

1.6.2.2 Claquage provoqué par de nombreuses particules

La présence de nombreuses particules de faible taille dans les liquides isolants rend difficile l'analyse et la visualisation de tous les phénomènes. Les études ont été réalisées principalement

par des mesures des tensions de claquage à faible distance en fonction de la concentration de particules de nature et de taille connue [ABGR75, GALL75, MATH78, MINE82, TRIN82, KAKO86]. Les résultats obtenus ont fourni les conclusions suivantes:

- i- la tension de claquage diminue quand la concentration de particules augmente [KAKO86, MINE82, MATH78, YOUN72];
- ii- les particules conductrices affectent plus la rigidité que les particules isolantes [KAKO86, ABGR75, MINE82, MATH78]. Dans certaines conditions, les particules de cuivre donnent lieu à une réduction de la rigidité plus forte que celles de fer. Les particules d'aluminium de masse volumique trois fois plus faible que celle d'acier ou de cuivre peuvent être plus facilement entraînées par une circulation d'huile forcée;
- iii- les fibres de cellulose ont peu d'effet tant qu'elles restent sèches. A mesure que leur teneur en eau augmente, la tension de claquage est fortement réduite [ABGR75, MINE82];
- iv- les particules de petites tailles ont une influence plus faible sur la rigidité. Entre deux électrodes planes soumises à une tension alternative, pour des particules métalliques de 2 et 5 μm , une augmentation de la concentration de 8 à 100 cm^{-3} diminue le champ de claquage d'un facteur 2 (de 200 kV/cm à 100 kV/cm) [KAKO86];
- v- les particules de larges tailles, qu'elles soient conductrices ou isolantes, ont plus d'effet. L'affaiblissement de la tension de claquage devient plus important lorsque leur dimension dépasse 40 μm [MINE82] (figure 1.14).

L'action des particules isolantes (essentiellement de la cellulose) est liée à la présence d'eau. Les particules de cellulose très hygroscopiques et en forme de fibres allongées, sont favorables à des renforcements importants du champ. Quand la teneur en eau augmente, les fibres deviennent plus conductrices et leur effet sur le champ de claquage peut être comparable à celui des particules métalliques. Cet effet dépend beaucoup de la température. A 90 °C, la rigidité de l'huile renfermant une grande concentration de particules de cellulose n'est pratiquement pas réduite. A cette température, la concentration de particules de cellulose doit être au moins 10 fois plus élevée qu'à la température ambiante pour un effet comparable [MINE82]. Ce fait est expliqué par la diminution de leur teneur relative en eau quand la température augmente, ce qui les rend moins conductrices.

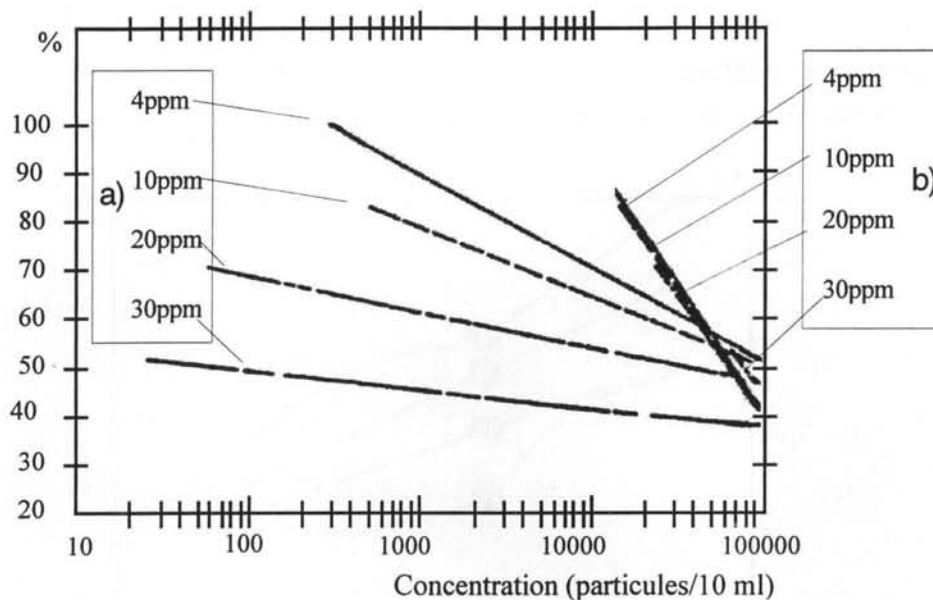


Figure 1.14: Influence de la teneur en particules de cellulose sur la tension de claquage sous tension alternative dans l'huile minérale [MINE82] :

a) taille moyenne des particules $45 \mu\text{m}$ à la température ambiante;

b) taille moyenne des particules $64 \mu\text{m}$ à la température de 90°C .

Les corps de permittivité élevée (eau, particules de cellulose humides) sont entraînés par l'effet diélectrophorétique dans les zones de champ intense, où ils forment des dipôles qui ont tendance à s'aligner et à former des "ponts". Ceci a été observé dans des intervalles millimétriques [MATH78, GOSW72, ROAC80, FLES81] mais l'influence sur le claquage n'a pas été mise clairement en évidence. Les ponts peuvent soit être balayés par la circulation du liquide, soit ne pas avoir de temps de se former quand la durée d'application de la tension est trop courte. De plus, au-dessus d'un champ seuil, qui dépend de la distance inter-électrodes, les ponts sont détruits sous l'action des mouvements électrohydrodynamiques.

1.6.3 EFFET DE LA TENEUR EN EAU

La présence d'eau dans une huile de transformateur est pratiquement inévitable. La quantité d'eau dissoute dans un liquide s'exprime en ppm (mg/kg), parties par million en masse. L'eau dissoute est à l'état dispersé; sa teneur dépend de la température et de la pression partielle d'eau dans l'atmosphère au-dessus du liquide, c'est à dire de l'humidité relative extérieure. Si cette dernière est de 100%, le liquide se sature en eau. A une température donnée, cette saturation correspond à l'apparition des premières gouttes d'eau condensées. L'eau constitue un danger potentiel pour les isolants; elle peut intervenir soit à court terme par son action directe (claquage), soit à long terme en favorisant certains processus de dégradation. Selon les conditions expérimentales, sa présence a plus ou moins d'effet sur la rigidité.

La figure 1.15 montre l'influence de la teneur en eau sur la tension de claquage en champ uniforme sous tension alternative et aux faibles distances (de quelques mm) dans l'huile de transformateur bien filtrée ainsi qu'en présence de particules métalliques ou isolantes.

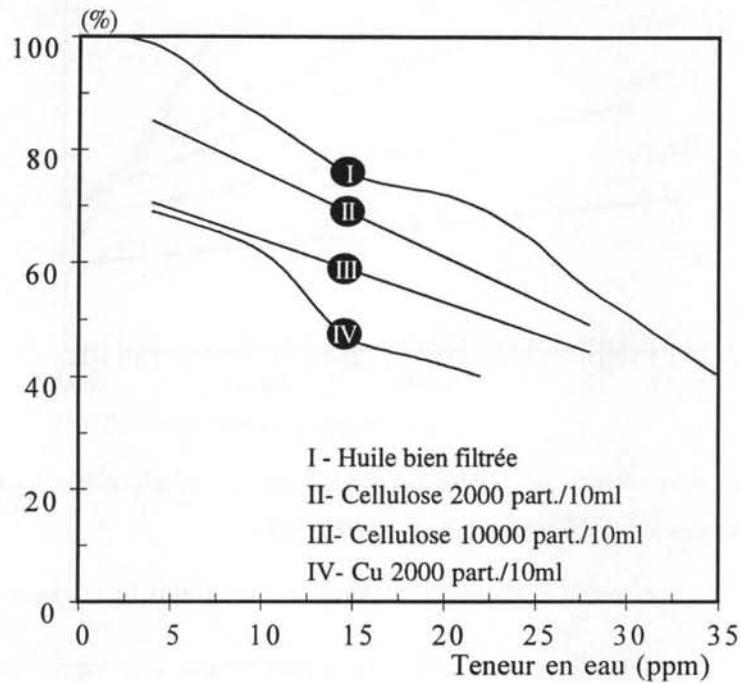


Figure 1.15: Influence de la teneur en eau sur la rigidité diélectrique de l'huile avec différentes concentrations de particules de natures diverses (taille de 45 µm) [MINE82].

Il a été établi que la tenue diélectrique de l'huile filtrée varie peu pour les très faibles teneurs en eau (jusqu'à 5 ppm, courbe I sur la figure 1.15). Elle chute ensuite lentement lorsque la teneur en eau augmente [ROAC80, MINE82, TOBA97]. Elle peut être divisée par un facteur supérieur à 3 dans un liquide fortement hydraté (figure 1.15). Au voisinage de la saturation, des gouttelettes d'eau peuvent se former et s'allonger sous l'action du champ; elles se comportent comme des objets conducteurs allongés qui donnent lieu à des renforcements de champ entraînant une diminution de la rigidité. L'accroissement de la teneur en eau contribue à abaisser la rigidité de l'huile renfermant soit des particules de cellulose soit des particules métalliques.

L'eau peut également favoriser, sous tension continue et alternative, l'injection de charges [BARR72, THOM72] particulièrement en champ non uniforme. Par conséquent, la présence d'eau peut également amplifier les mouvements électrohydrodynamiques [ROAC80].

Conclusion sur la génération des streamers sous tension alternative et sur le claquage dans les applications

Les effets de volume et le rôle des particules de diverses natures ont été observés essentiellement en mesurant la tension de claquage en champ quasi uniforme à faible distance.

Afin de mieux comprendre l'influence de ces paramètres sur la génération des streamers, nous prolongerons l'étude de la génération des streamers sous tension alternative et en géométrie divergente déjà entreprise au LEMD [LESA87, IREQ95]. Afin de nous rapprocher des conditions réelles d'utilisation des liquides, nous utiliserons des électrodes de plus grand rayon de courbure, en contrôlant strictement l'état du liquide (teneur en eau, particules).

Le cas du claquage déclenché par une grosse particule unique a été bien étudié sur le plan expérimental [RAIN92, CARRA95] ainsi que dans des études théoriques [TOBA96b] sous tension continue ou alternative.

Dans notre travail, nous nous intéresserons au cas plus réaliste de la présence de nombreuses particules aléatoirement distribuées et à la présence d'eau. Dans la littérature, l'effet de telles pollutions sur la rigidité a été étudié à faibles distances (2,5 mm avec la procédure établie par les normes d'essais de claquage). Dans ces essais, les champs de claquage (environ 400 kV/cm dans l'huile bien propre) sont beaucoup plus forts que les champs observés avec de grands volumes. Par exemple, lors d'essais réalisés sous très haute tension avec une sphère de diamètre de 28 cm [IREQ95], les champs d'apparition de décharges varient entre 52 kV/cm et 90 kV/cm suivant l'état du liquide.

En effectuant des mesures de tension de claquage en présence de polluants avec des conditions plus réalistes que dans les essais normalisés (plus grands volumes), nous tenterons d'évaluer l'influence réelle de ces paramètres sur le claquage dans les applications.

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Sommaire

2.1 PREAMBULE.....	57
2.2 SYSTEMES D'ELECTRODES.....	57
2.3 CELLULES D'ESSAIS.....	57
2.4 LIQUIDE UTILISE ET TRAITEMENT.....	61
2.5 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX.....	63
2.6 SYSTEME DE VISUALISATION.....	68
2.7 MESURES DE COURANT ET DE LUMIERE.....	69

CHAPITRE 2 : *TECHNIQUES EXPERIMENTALES*

2.1 PREAMBULE

La plupart de nos connaissances sur les phénomènes prédisruptifs dans les liquides diélectriques reposent principalement sur l'observation des streamers par des techniques optiques simultanément avec des mesures soit du courant associé, soit de la lumière émise.

Dans ce chapitre, nous présentons les techniques et les méthodes utilisées dans nos expériences. Un certain nombre d'entre elles proviennent d'études antérieures réalisées au LEMD. Il a été également nécessaire de construire quelques dispositifs spécifiques pour cette étude : cellule d'essais (§2.3.1), dispositif de traitement d'huile (§2.4.2), générateur haute tension (§2.5.1.1).

2.2 SYSTEMES D'ELECTRODES

Afin d'étudier les conditions de génération des streamers et l'effet de volume, nous avons fait varier le rayon de courbure d'électrodes et le volume d'huile dans une large mesure. Les différents systèmes d'électrodes (fortement divergent pointe-plan, peu divergent tige-plan, semi-uniforme ou quasi-uniforme), dont les propriétés sont décrites au §1.2, ont été utilisés. Nous les décrirons en détail pour chaque configuration utilisée dans le paragraphe suivant.

2.3 CELLULES D'ESSAIS

Trois cellules différentes ont été utilisées. En règle générale, les cellules sont placées dans une cage de Faraday, lors des essais sous très haute tension. Cette cage permet, d'une part, d'atténuer les rayonnements électromagnétiques dus aux claquages qui peuvent perturber le fonctionnement des appareils sensibles (micro-ordinateurs, oscilloscopes, etc.) et d'autre part d'avoir une chambre parfaitement noire qui facilite la détection des streamers, phénomènes très peu lumineux.

2.3.1 PREMIERE CELLULE (figure 2.1)

Elle est constituée d'un corps cylindrique creux d'une épaisseur de 2 cm en Téflon et équipée de deux fenêtres en verre permettant de visualiser les streamers dans tout l'intervalle d'huile entre les électrodes. Le volume d'huile est d'environ 150 cm³.

Dans cette cellule, deux systèmes d'électrodes ont été employés : le premier est une géométrie fortement divergente (pointe-plan) et l'autre une géométrie semi-uniforme. Dans les deux configurations, l'électrode plane est un disque en cuivre de diamètre 45 mm et d'épaisseur 1 mm dont le bord est arrondi. La surface du plan est bien polie et recouverte par un isolant solide dit "*plan bloquant*", qui empêche le claquage lorsqu'un streamer parcourt totalement la distance

inter-électrodes. Le plan bloquant doit être un matériau dont la permittivité est la plus proche possible de celle du liquide pour ne pas perturber la distribution du champ. Dans notre étude, des plaques en polyéthylène ($\epsilon \approx 2,2$) d'une épaisseur de 0,8 mm ont été choisies.

Géométrie divergente pointe-plan

Les pointes utilisées de rayon de courbure r_p de $1 \mu\text{m}$ à quelques centaines de μm sont soudées dans un tube en acier de diamètre 0,5 mm et supportées par un porte-électrode en laiton. Les pointes de rayon inférieur à $100 \mu\text{m}$ sont fabriquées à partir d'un fil de tungstène (diamètre $100 \mu\text{m}$ ou $200 \mu\text{m}$) érodé au rayon de courbure r_p par voie électrochimique dans une solution d'hydroxyde de potassium KOH. Les pointes de r_p supérieur à $100 \mu\text{m}$ ont été faites en acier. Les rayons de courbure sont contrôlés par un microscope dont la limite de résolution est d'environ $1 \mu\text{m}$.

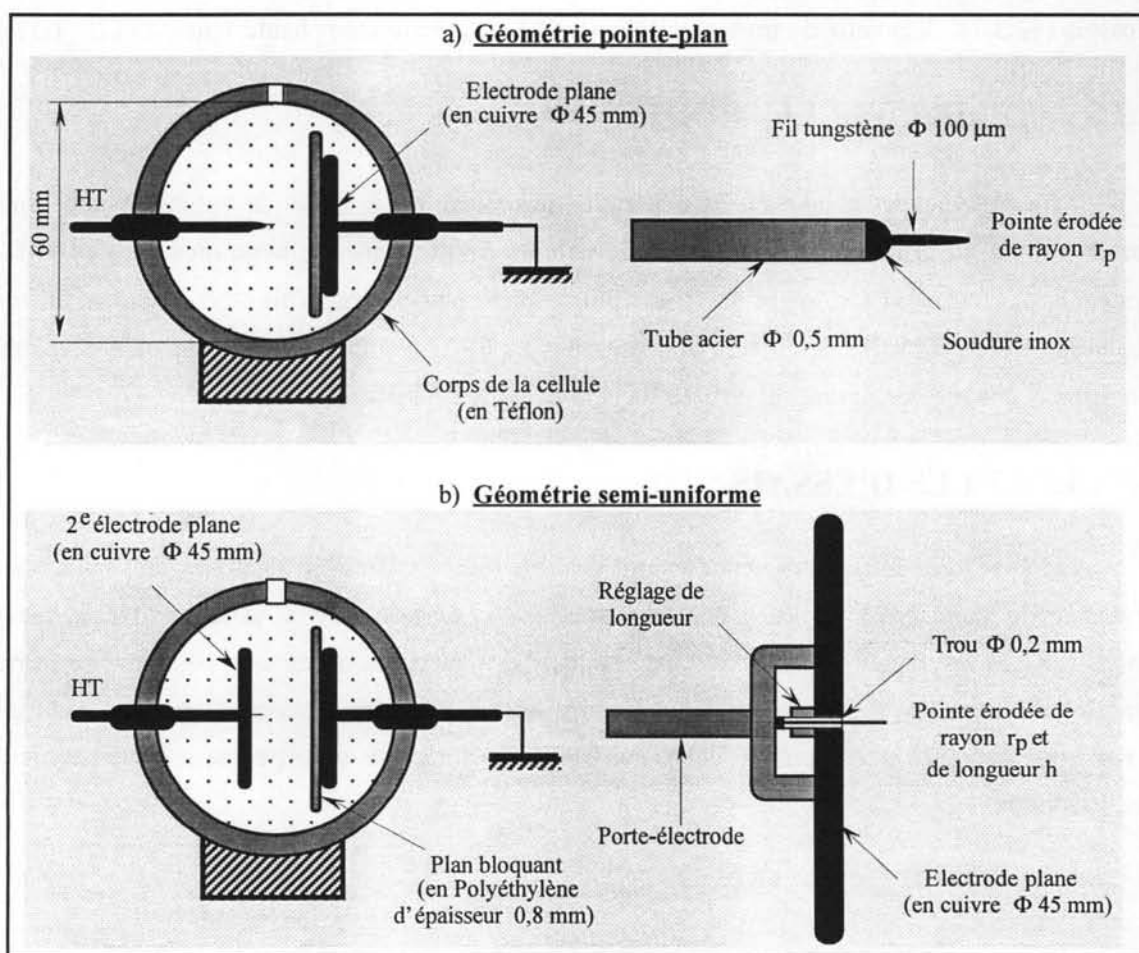


Figure 2.1: Première cellule d'essais avec configurations d'électrodes pointe-plan et semi-uniforme.

Géométrie semi-uniforme

Une pointe de rayon de courbure r_p émerge d'une longueur h de la surface du deuxième plan au travers d'un trou de 0,2 mm. Les pointes sont réalisées de la façon décrite précédemment. Un

réglage situé en arrière du plan permet de faire varier la longueur de la pointe. Les rayons de courbure r_p sont limités à 25 μm .

La distance inter-électrodes peut être réglée jusqu'à 25 mm. La cellule a été construite pour des essais sous tension impulsionnelle d'amplitude maximale de 100 kV.

2.3.2 DEUXIEME CELLULE

La génération de streamers avec des pointes de rayon plus important (tige) nécessite une source de tension plus élevée et aussi une cellule plus volumineuse. Cela nous a conduit à utiliser une deuxième cellule pour des essais sous créneaux de tension délivrés par un générateur de Marx (amplitude jusqu'à 500 kV). Cette cellule est constituée d'une cuve parallélépipédique en PVC de dimensions internes 250 mm x 250 mm x 350 mm (figure 2.2). Le PVC a été choisi pour sa compatibilité avec l'huile minérale. La visualisation de l'espace entre les électrodes est possible grâce à deux cotés transparents en PMMA (polyméthylméthacrylate) de 5 mm d'épaisseur.

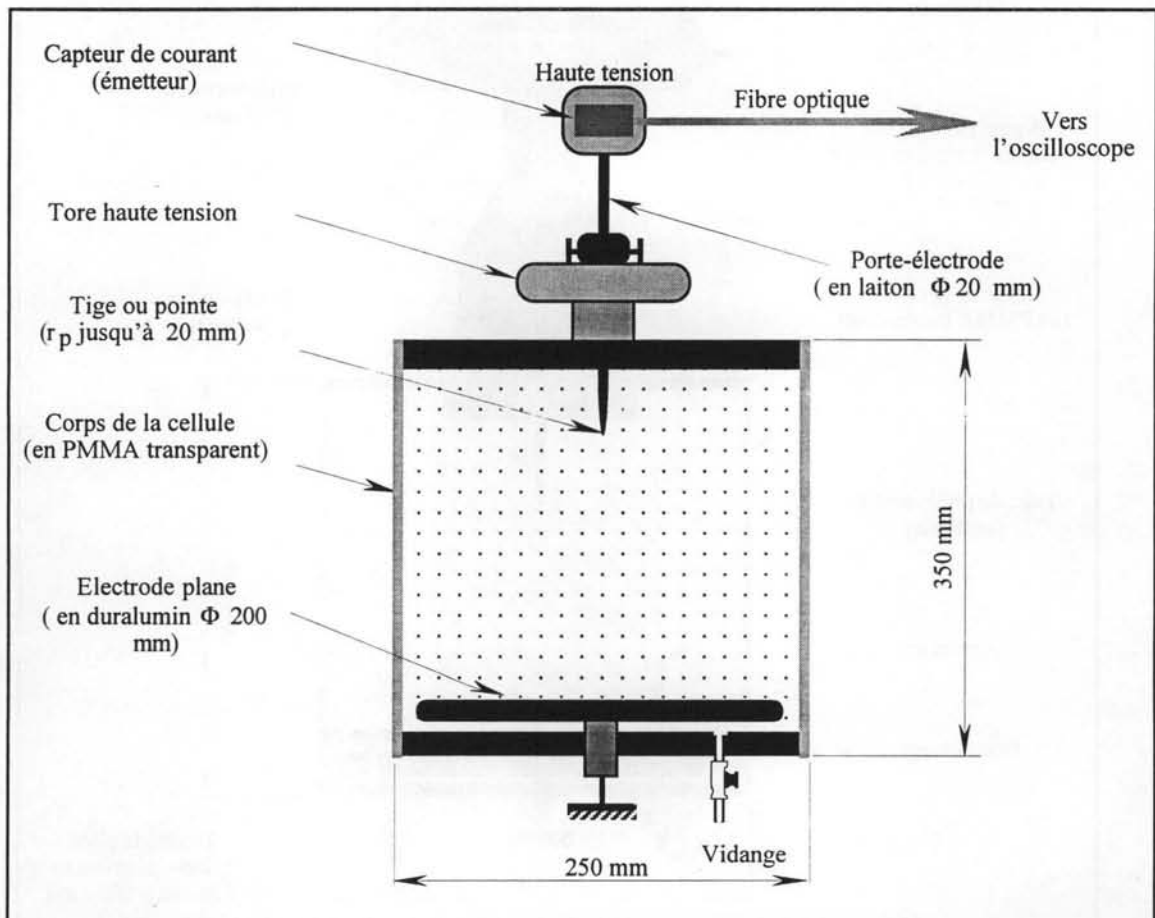


Figure 2.2: Deuxième cellule d'essais.

L'électrode plane est un disque en duralumin de diamètre 20 cm et d'épaisseur 1 cm. L'électrode haute tension est constituée d'une tige en acier inoxydable à extrémité hémisphérique fixée au bout d'un tube porte-électrode. Dans ces essais, le rayon de courbure r_p de la tige varie de

0,5 mm jusqu'à 20 mm. L'impédance de mesure de courant est placée à l'intérieur du tube support pour minimiser l'inductance du circuit (voir § 2.7.1). Le tore a pour but de diminuer le champ autour du tube lors des essais à très haute tension.

La distance inter-électrodes peut varier jusqu'à 200 mm et le volume d'huile est d'environ 20 litres. Sur sa partie inférieure est aménagée une sortie pour la vidange de la cellule.

2.3.3 TROISIEME CELLULE

L'étude sous tension alternative a été effectuée avec une cellule encore plus volumineuse (d'une contenance de 200 litres). Le corps de la cellule a été construit à partir de plaques collées en PMMA d'une épaisseur de 15 mm (figure 2.3). Ses dimensions sont 500 x 500 x 600 mm permettant de varier la distance inter-électrodes jusqu'à 500 mm. Le plan est une plaque carrée en duralumin (500 x 500 mm). Sa partie haute est constituée d'un compartiment étanche rempli d'huile de transformateur.

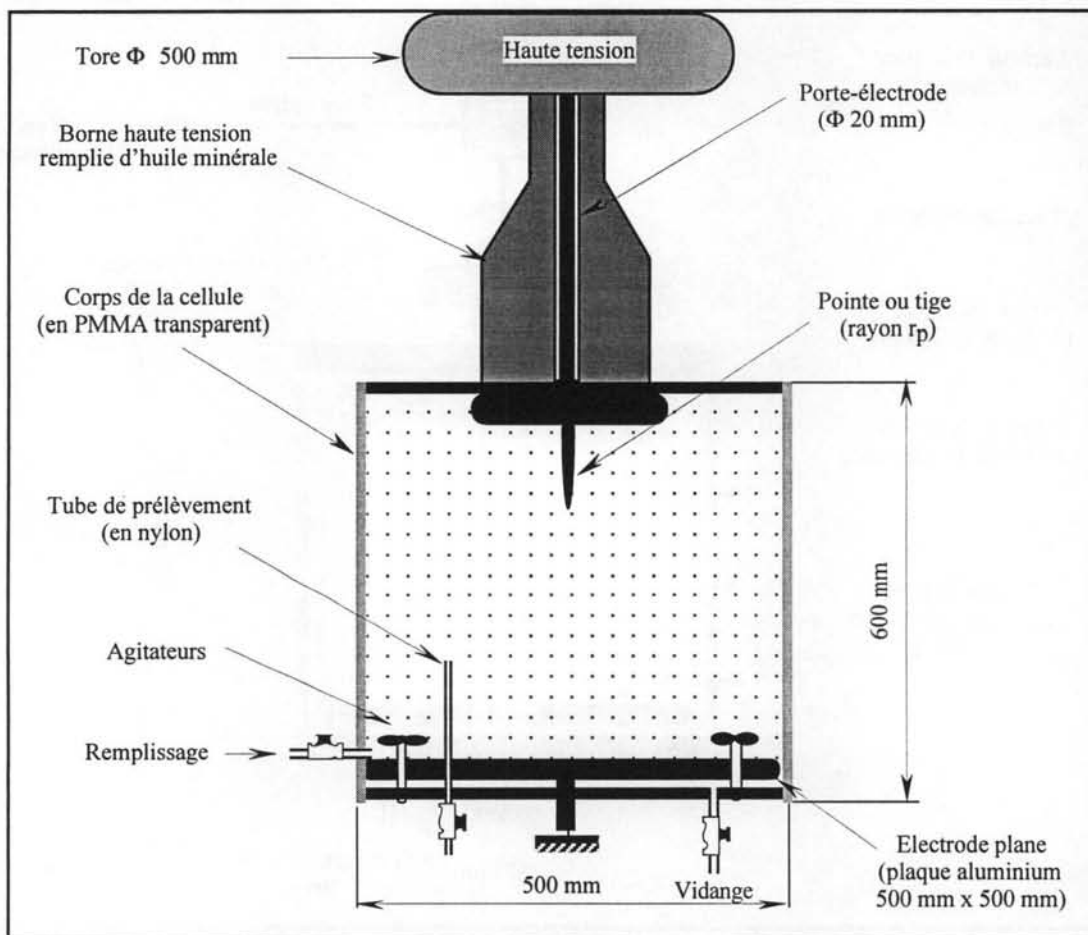


Figure 2.3: Troisième cellule d'essais

En haut de cette borne est placé un tore de diamètre 500 mm. Le conducteur central est un tube en laiton dans lequel coulisse de manière étanche un tube porte-électrode de diamètre 20 mm. Au bout de ce tube, sont fixées des pointes ou des tiges dont le rayon r_p de courbure varie de

quelques μm à quelques dizaines de mm. Les pointes jusqu'à 100 μm ont été fabriquées par la méthode décrite précédemment.

Le dimensionnement de la cuve a été fait par le calcul numérique de champ à l'aide du logiciel CSP [LEVI93] de façon à avoir un champ externe à la cellule inférieur au champ disruptif dans l'air. La conception de la cellule permet de faire des essais jusqu'à 300 kV efficace en alternatif. Lors des essais à la tension maximale, quelques claquages ont perforé les parois latérales de la cellule, et donc son utilisation a été limitée à des tensions inférieures à 400 kV crête. L'homogénéité de l'huile dans la cellule au cours des expériences est assurée par un système de deux agitateurs à hélices en polyéthylène placés à la partie inférieure de la cellule. Le sens et la vitesse de rotation peuvent être réglés. Le remplissage et la vidange de la cellule sont effectués par deux tubes d'entrée et de sortie aménagés à la partie inférieure de la cellule. Un tube en Nylon débouchant à 20 cm au-dessus du plan permet de prendre des prélèvements destinés au comptage des particules et aux mesures de la teneur en eau.

2.4 LIQUIDE UTILISE ET TRAITEMENT

2.4.1 LIQUIDE UTILISE

Dans toute notre étude, l'huile minérale de transformateur VOLTESSO 35 a été utilisée. Ce liquide isolant est destiné aux transformateurs de puissance et aux disjoncteurs haute tension fonctionnant à l'huile et ses caractéristiques sont données à l'annexe A.1.

2.4.2 SYSTEME DE TRAITEMENT DE L'HUILE

Afin d'étudier l'influence de différents types de pollutions, nous avons construit et mis au point un dispositif de traitement d'huile dont le schéma est présenté sur la figure 2.4.

Ce système permet de contrôler l'état de pollution par la filtration, la déshydratation et par l'addition de quantités connues d'eau et de particules. D'autre part, le système forme un circuit fermé avec la cellule volumineuse n°3, ce qui facilite le vidage ou le remplissage de la cellule.

2.4.2.1 Filtration de l'huile

Une unité mobile de filtration PALL TRANFILTRE MKIIA équipée d'éléments filtrants de dépollution DP a été installée entre la cellule d'essais et le réservoir (figure 2.4). Il est constitué d'un groupe motopompe triphasée 380 V-0,55 kW à engrenage de débit 30 l/mn et de pression de refoulement maximale 4 bar. L'évacuation de l'huile est connectée sur le fond de la cellule et le remplissage est effectué sur le côté.

Le filtrage de l'huile contenue dans la cellule dure environ 30 minutes. Cette opération diminue considérablement la teneur en particules de l'huile et augmente sa tenue diélectrique. Les grandes particules (quelques dizaines de μm) sont pratiquement éliminées.

2.4.2.2 Déshydratation

Après la filtration, l'huile est transmise au réservoir en inox d'une contenance d'environ 300 litres, où elle est chauffée jusqu'à la température de 65° C (afin de ne pas dégrader d'huile) et sous vide (10^{-2} bar). Trois agitateurs magnétiques placés sur la partie inférieure du réservoir mettent l'huile en circulation. Le vide, l'échauffement et le mouvement de l'huile provoquent le dégazage et le séchage de l'huile. La durée du traitement est assez longue (quelques heures) pour obtenir de l'huile avec la teneur en eau la plus basse possible. Une bouteille d'azote permet de casser le vide afin d'empêcher l'air humide d'entrer en contact avec l'huile sèche.

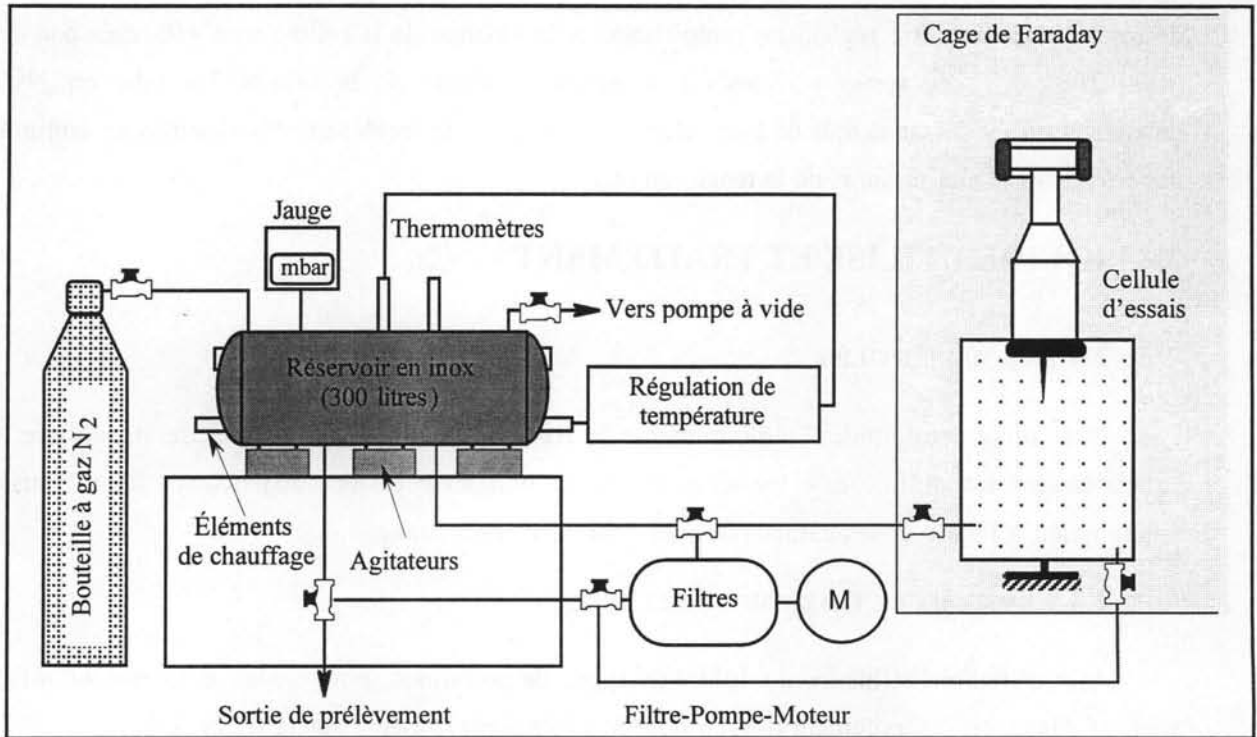


Figure 2.4: Système de traitement de l'huile

2.4.2.3 Contrôle de l'état de l'huile

a) Comptage de particules

Le comptage des particules a été effectué par le service de surveillance et d'expertise par analyse d'huile chez Jeumont-Schneider Transformateur (voir exemple en annexe A.2). La distribution des particules dans un liquide isolant est répartie en différentes classes suivant leur taille, qui correspondent à la pratique industrielle :

Catégorie 1 : de 2 à 5 μ m;	Catégorie 5 : de 25 à 50 μ m;
Catégorie 2 : de 5 à 10 μ m;	Catégorie 6 : de 50 à 100 μ m;
Catégorie 3 : de 10 à 15 μ m;	Catégorie 7 : de 100 à 150 μ m;
Catégorie 4 : de 15 à 25 μ m;	Catégorie 8 : supérieure à 150 μ m.

Le résultat du comptage est donné par le nombre moyen de 5 essais sur 100 cm^3 d'huile. Grâce au dispositif décrit au-dessus, nous pouvons atteindre une teneur assez faible en particules après la filtration : quelques centaines de particules de taille 5-10 μm . Les grosses particules sont éliminées.

b) Mesure de la teneur en eau

L'eau dissoute dans le liquide est à l'état dispersé. Sa teneur dépend de la température et de la pression partielle d'eau au-dessus du liquide. Elle est exprimée en partie par million en masse (ppm). Le coulomètre KF 684 a été utilisé pour mesurer la teneur en eau qui est déterminée par la valeur moyenne de dix essais.

Avec les prélèvements de l'huile déshydratée du réservoir, nous avons mesuré une teneur en eau de moins de 5 ppm. Il a été remarqué que l'huile dans le circuit de remplissage était contaminée par l'essai précédent, ce qui explique que dans la cellule l'huile initiale utilisée était d'une humidité d'environ 10 ppm.

c) Addition des particules

L'huile filtrée et déshydratée est considérée comme l'huile de référence. Par la suite, différents polluants (particules, eau) ont été ajoutés à la cellule.

Lors de l'addition de particules ou d'eau dans la cellule, il est nécessaire de procéder en deux étapes afin d'obtenir une distribution homogène des particules. La première phase consiste à mélanger, à l'aide d'un agitateur magnétique, une quantité contrôlée de polluants dans un flacon contenant le même liquide que la cellule. Dans un second temps, la solution concentrée obtenue est versée dans la cellule en présence de forte agitation.

2.5 DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

2.5.1 DISPOSITIFS D'ESSAIS SOUS TENSION IMPULSIONNELLE

Deux montages expérimentaux destinés aux études sous créneaux de tension ont été utilisés :

- 1 -impulsions de tension d'amplitude maximale de $\pm 80 \text{ kV}$ et de temps de montée rapide (environ 20 ns);
- 2 -impulsions d'amplitude jusqu'à $\pm 500 \text{ kV}$ fournies par le générateur de Marx mais avec un temps de montée plus long ($\approx 0,4 \mu\text{s}$).

2.5.1.1 Générateur de créneaux de tension à éclateurs (figure 2.5)

Des créneaux de tension avec un front très raide ont été délivrés par un générateur à éclateurs mis au point au laboratoire lors de cette étude. Les impulsions d'amplitude maximale de $\pm 80 \text{ kV}$ ont une forme pratiquement rectangulaire et de durée réglable de quelques centaines de ns

jusqu'à 100 μ s. Le temps de montée ou de descente est de l'ordre de 20 ns. Le principe de fonctionnement de ce générateur est présenté sur la figure 2.5.

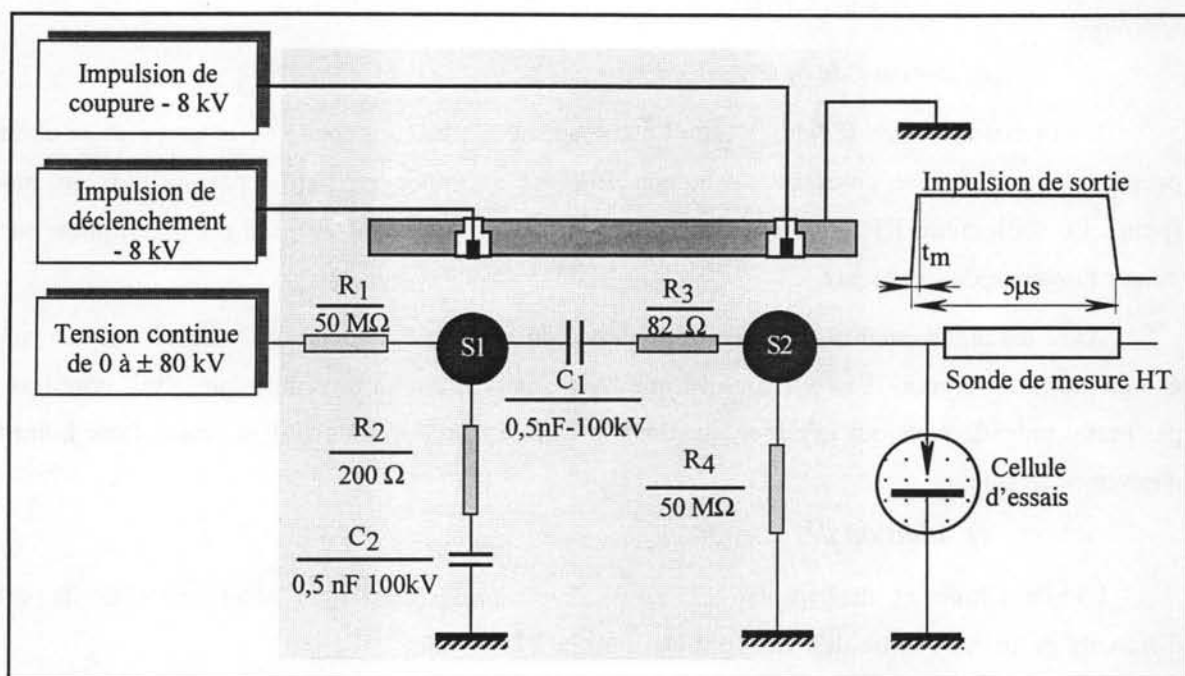


Figure 2.5: Générateur de créniaux de tension à éclateurs

Une source haute tension continue de 0 à ± 80 kV charge le condensateur C_1 à travers les résistances R_1 , R_3 et R_4 . La première impulsion de déclenchement d'une amplitude - 8 kV synchronisée par l'ordinateur (voir aussi la figure 2.10) déclenche un arc entre la première sphère S_1 et le plan (connecté à la terre), ce qui fait passer la tension de la sortie de 0 à +V si la tension de charge est négative. Grâce au circuit de très basse inductance et à la faible valeur ohmique de la résistance R_3 , le temps de montée est très rapide (quelques dizaines de ns) sans oscillation. Une seconde décharge entre la deuxième sphère S_2 et le plan déclenchée par l'impulsion de coupure court-circuite ensuite la sortie. Le retard entre le signal de déclenchement et celui de coupure est réglable pour obtenir la durée voulue des impulsions. La deuxième capacité C_2 , placée en parallèle avec la première sphère, sert à maintenir l'arc électrique entre S_1 et la masse jusqu'à la deuxième décharge.

2.5.1.2 Générateur de Marx (figure 2.6)

Pour les essais à tension plus élevée, nous avons utilisé le générateur de choc de Marx, réalisé au LEMD, dont le circuit équivalent est schématisé sur la figure 2.6.

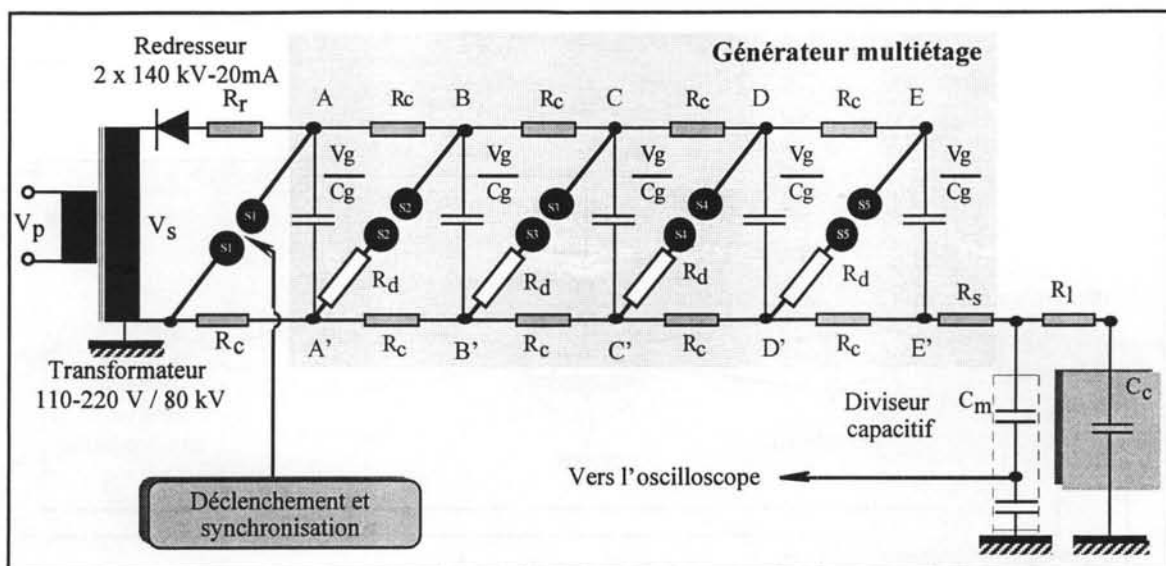


Figure 2.6: Schéma équivalent du générateur de Marx du LEMD

Ce générateur comporte 5 étages, chacun constitué d'une capacité $0,1 \mu\text{F}$ -100 kV, des éclateurs et des résistances de charge R_c et de décharge R_d . Il est alimenté en tension continue par l'intermédiaire d'un transformateur monophasé 110-220 / 80 kV, 50 Hz et à l'aide de deux redresseurs 140 kV-20 mA placés en série. Chaque étage peut être chargé jusqu'à une tension de ± 100 kV crête. La forme de l'onde de tension est déterminée par les paramètres du circuit (C_g , C_m , R_c , R_d et R_s). Les capacités parasites entre des éléments du générateur et l'inductance du circuit ne sont pas négligeables; elles interviennent également sur la forme du créneau de sortie.

En négligeant les pertes, ce générateur peut fournir des impulsions d'amplitude maximale de ± 500 kV avec une onde de tension de forme $0,4/1400 \mu\text{s}$, ce qui donne une tension quasiment constante durant la propagation des streamers. Pour limiter les courants produits par le claquage, une résistance $R_l=300 \Omega$ est placée en série avec la cellule.

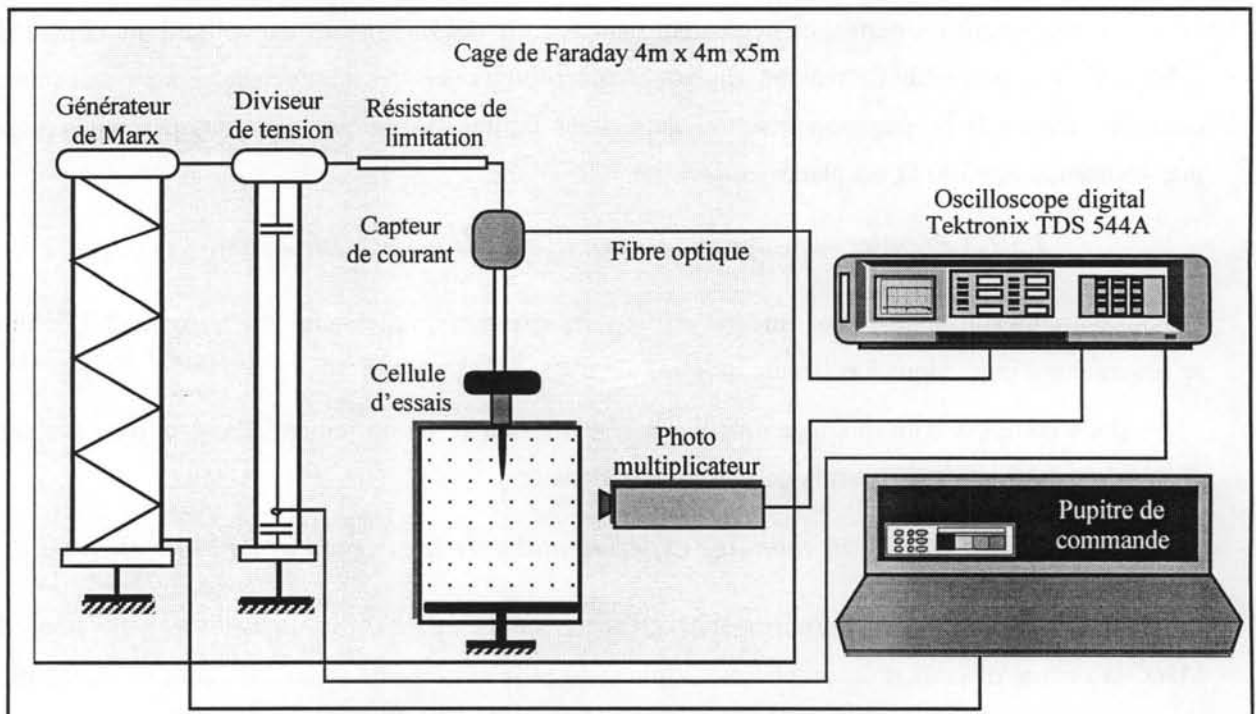
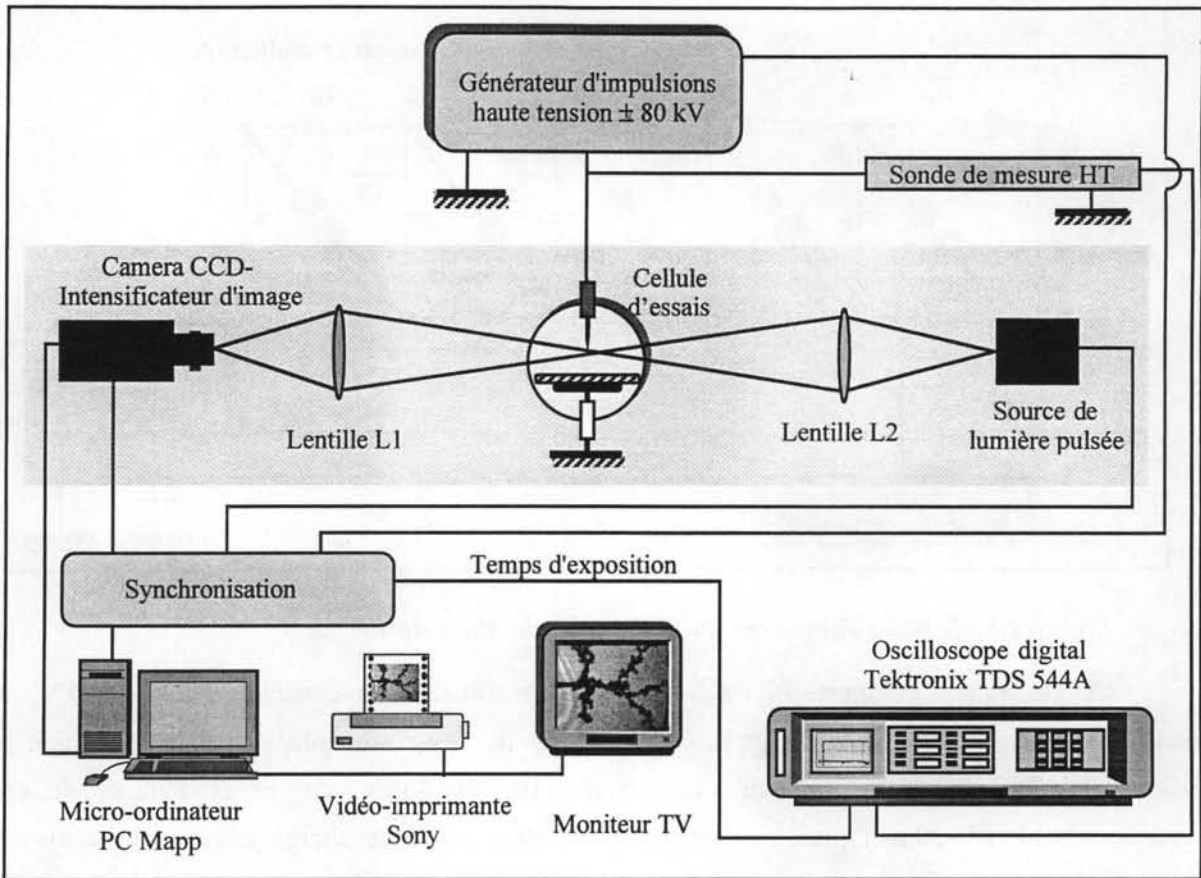
2.5.1.3 Premier montage expérimental avec le générateur à éclateurs (figure 2.7)

Le premier dispositif expérimental d'étude des streamers, représenté sur la figure 2.7, utilise le générateur d'impulsions à éclateurs et la cellule d'essais n°1.

Il est composé d'un montage optique de visualisation et de traitement d'image, d'un système de synchronisation, de dispositifs de mesure des signaux.

2.5.1.4 Deuxième montage expérimental avec le générateur de Marx (figure 2.8)

Le deuxième montage expérimental présenté sur la figure 2.8 comporte le générateur de Marx, la cellule d'essais n° 2, un photomultiplicateur et le système de mesure du courant décrit plus loin dans ce chapitre. Les dispositifs tels que le générateur, la cellule, le photomultiplicateur et le dispositif de mesure du courant se trouvent à l'intérieur d'une grande cage de Faraday (4m x 4m x 5m).



La génération des streamers est détectée simultanément par le courant associé et la lumière émise. Le courant est mesuré à l'aide d'un dispositif placé du côté haute tension et relié à l'oscilloscope par fibre optique (voir §2.7.1). La tension issue du diviseur capacitif est enregistrée par l'oscilloscope.

2.5.2 DISPOSITIF D'ESSAIS SOUS TENSION ALTERNATIVE

Ce troisième montage expérimental, dont le schéma est présenté sur la figure 2.9, est utilisé pour étudier les streamers sous très haute tension alternative (jusqu'à 300 kV efficace). Il comporte la source haute tension alternative, la cellule d'essais n° 3, le photomultiplicateur, un montage optique de visualisation. Le dispositif expérimental est placé dans une cage de Faraday de dimension 5 m x 5 m x 6 m.

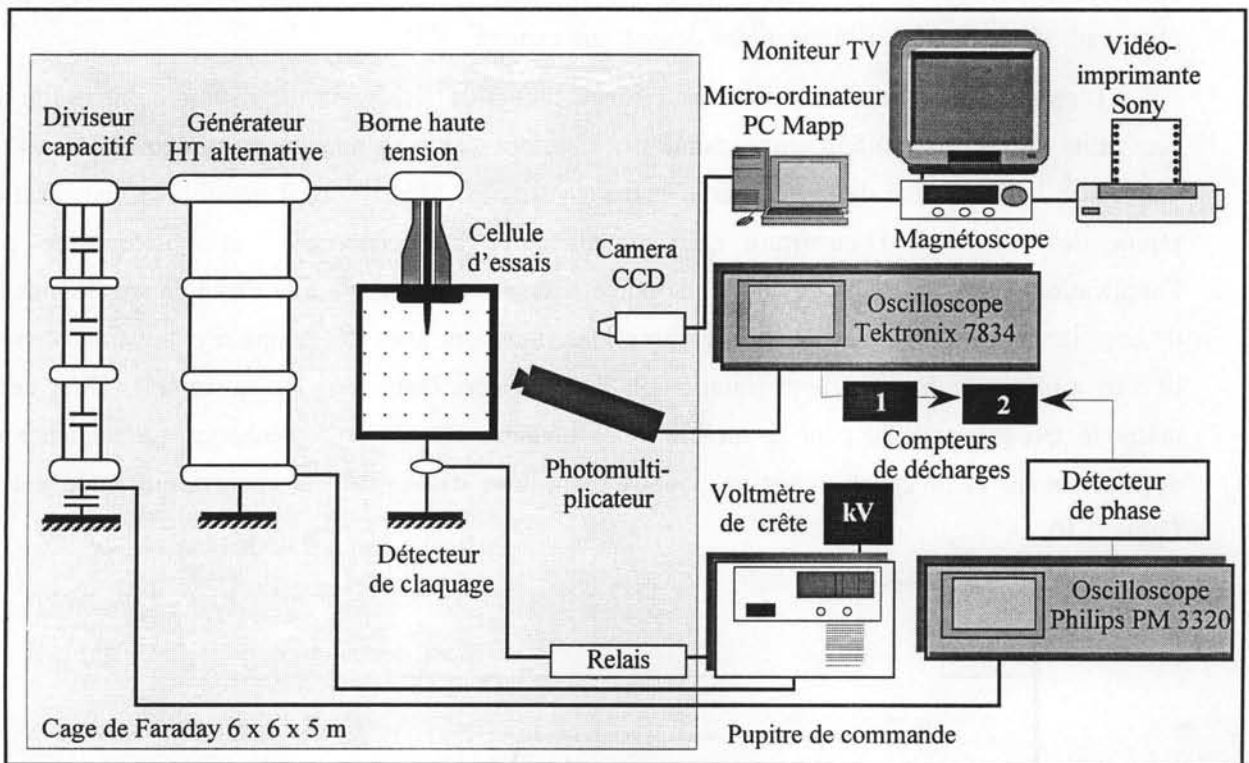


Figure 2.9: Dispositif expérimental utilisé pour des essais sous tension alternative

La tension alternative 50 Hz est produite par trois transformateurs de 100 kV maximum mis en cascade et équipés d'un tore de grandes dimensions afin d'éliminer les décharges couronnes. Ils sont reliés à la cellule d'essais par une borne haute tension sur la partie haute de la cellule. Le streamer est détecté par la lumière émise à l'aide d'un photomultiplicateur placé en face de la cellule. Les comptages ont été réalisés en utilisant deux fréquencemètres numériques (FERISOL HB210) connectés à l'oscilloscope, lui-même déclenché par le PM. Ce système permet de compter toutes les décharges détectées par le PM pendant un intervalle de temps donné. Après la détection d'une décharge, le système reste bloqué pendant une période de 500 μ s afin de compter effectivement le nombre de streamers et non les nombreuses impulsions qui les composent. Un

détecteur de phase placé entre deux compteurs permet de séparer les décharges générées pendant les alternances positives ou négatives et de les compter indépendamment.

Une caméra vidéo avec un système de traitement d'images Synaps MAPP permet l'observation du mouvement des particules sous l'effet du champ électrique.

2.6 SYSTEME DE VISUALISATION

La technique utilisée pour visualiser les streamers s'appelle l'ombroscopie et est basée sur le fait que les streamers ont un indice de réfraction inférieur à celui du liquide et dispersent la lumière. Le principe de l'ombroscopie consiste à éclairer la totalité de l'espace inter-électrodes par une source de lumière pulsée durant la propagation des streamers et à photographier l'ombre portée du streamer (figure 2.7). La lentille L_2 ($f=50/100$ mm) projette l'image des streamers sur la photocathode de l'intensificateur placé devant une caméra CCD.

L'usage d'un tube intensificateur d'image obturable (Hamamatsu V3063U, intervalle de sensibilité spectrale: 450-850 nm), couplé par fibre optique avec une caméra vidéo (RTC56474) connectée à un système de traitement d'image (Synaps PC MAPP), rend possible la visualisation rapide des streamers. L'ouverture de l'intensificateur est commandée et synchronisée par l'application d'une impulsion de 200 V. La durée d'ouverture est égale à la durée de son impulsion de commande, ce qui permet de photographier les streamers avec des temps d'exposition variant de 5 ns à plusieurs dizaines de μ s (intégration de la lumière émise par les streamers). C'est cette méthode qui sera utilisée pour la mesure de la longueur d'arrêt de la décharge. La séquence de déclenchement et de synchronisation pour la réalisation d'une prise de vue est présentée sur la figure 2.10.

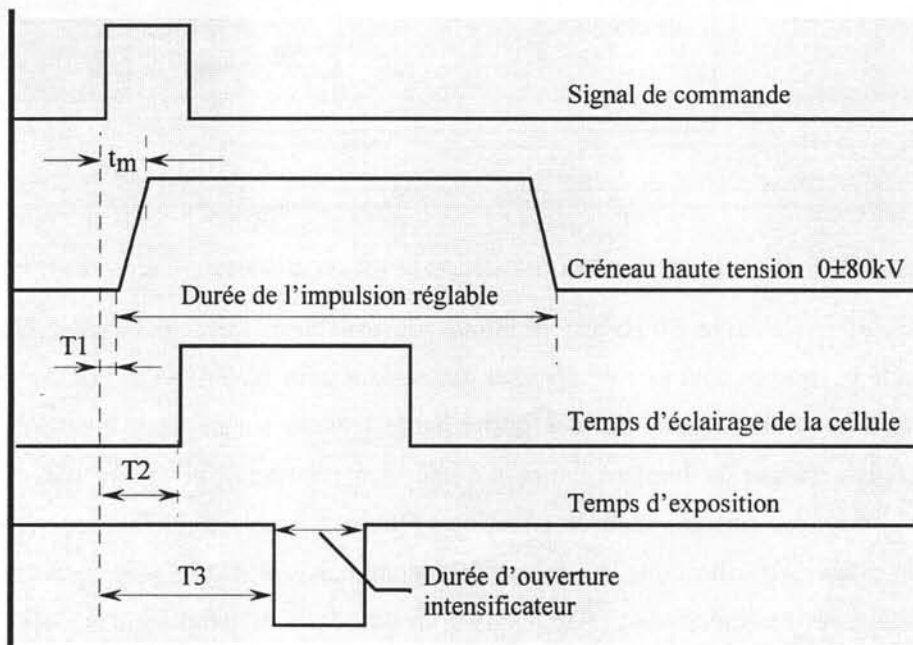


Figure 2.10: Séquence de déclenchement et prise d'une image

La caméra CCD à intensificateur enregistre des images de streamers et les transfère directement à une carte d'acquisition d'image Synaps PC MAPP (8 bits, résolution 512 x 288 ou 384 x 288 pixels) placée sur un ordinateur. Cette carte contrôle la synchronisation du balayage de la caméra vidéo et numérise l'image des streamers. Les images des streamers peuvent être traitées numériquement à l'aide du logiciel NIH ou être imprimées par l'imprimante vidéo Sony UPP890CE.

Les premiers événements prédisruptifs étant de taille très faible il est nécessaire que la résolution du montage optique soit de l'ordre d'un micromètre pour les détecter.

2.7 MESURES DE COURANT ET DE LUMIERE

2.7.1 MESURES DE COURANT (dispositif sur la figure 2.8)

L'amplitude du courant transitoire (ou de la charge) associée à la propagation des streamers est mesurée sur la pointe portée à la haute tension grâce à un dispositif de couplage par fibre optique, réalisé au laboratoire. Le principe de cette mesure consiste à mesurer le courant à travers une résistance non inductive de $5\ \Omega$ en série avec la pointe (voir la figure 2.11).

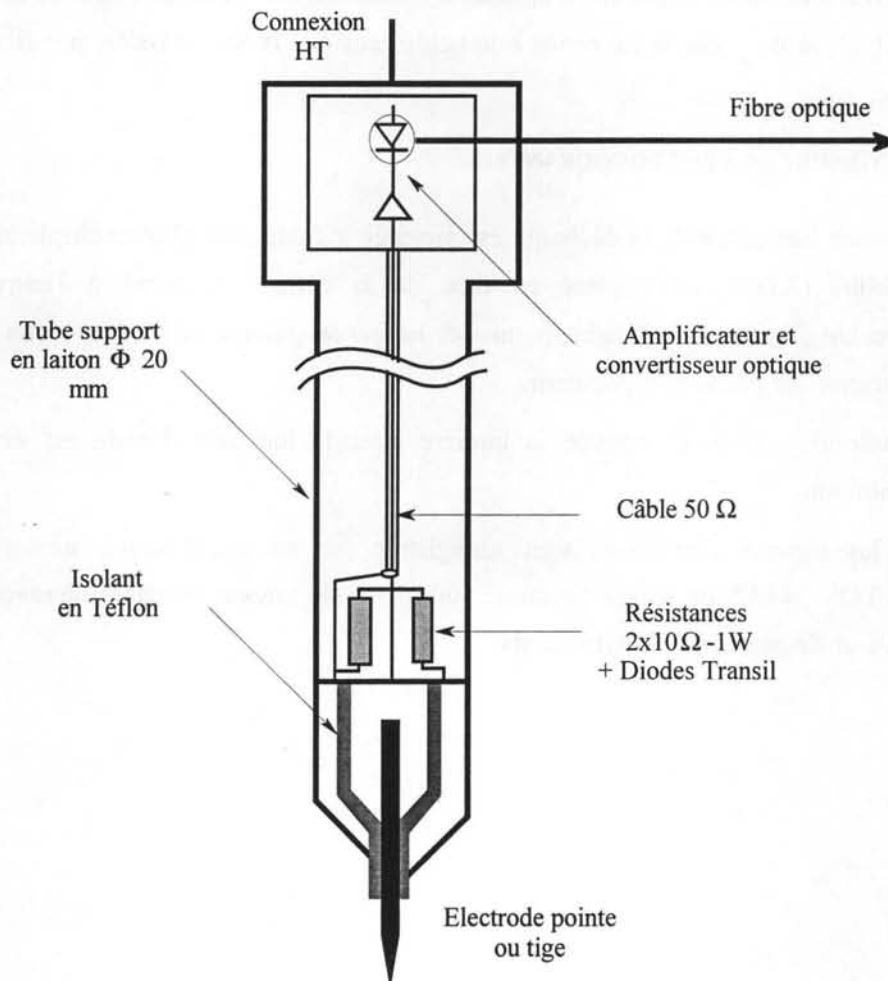


Figure 2.11: Disposition des impédances de mesure de courant

Les mesures de courant effectuées sur le côté haute tension offrent de nombreux avantages par rapport à celle réalisée du côté de la masse [RAIN94] : en mesurant le courant du côté de la masse, étant donné que le diamètre du plan utilisé au cours des essais n'est pas infini, une fraction seulement du courant de déplacement est mesuré.

Le dispositif de mesure du courant réalisé au LEMD possède une bande passante de l'ordre de 30 MHz. La sensibilité maximale est de quelques mA.

Ce montage, associé au système de support de pointe blindé utilisé dans la cellule d'essai, conduit également à une réduction très sensible des problèmes dus aux perturbations électromagnétiques, bruit de la source de tension, courants de masse, courant de charge de la cellule, couplage électrostatique non total entre les électrodes, habituellement rencontrés dans le cas de mesures effectuées côté plan à la masse.

Le montage permet la mesure des courants avec un temps de montée de 20 ns, une sensibilité maximum de quelques mA, il est protégé contre le claquage à l'aide de diodes Transil. L'impédance de mesure est placée à l'extrémité du tube support d'électrodes et directement connectée à la pointe en vue de minimiser l'inductance du circuit. Le signal du courant est amplifié, converti et transmis par fibre optique à l'oscilloscope. L'amplificateur et le convertisseur optique étant placé dans une boîte reliée à la haute tension, la transmission par fibre optique est indispensable.

2.7.2 MESURE DES PHOTOCOURANTS

L'émission lumineuse de la décharge est mesurée à l'aide d'un photomultiplicateur (PM) de haute sensibilité (RTC56AVP) placé en face de la cellule connecté à l'entrée 50 Ω de l'oscilloscope. Un diaphragme ajustable permet de limiter la quantité de lumière reçue en dessous du seuil de saturation du photomultiplicateur.

Ce photomultiplicateur détecte la lumière dont la longueur d'onde est comprise entre 300 nm et 600 nm.

Tous les signaux électriques sont enregistrés sur un oscilloscope numérique 4 voies "Tektronix TDS 544A" de bande passante 500 MHz, de vitesse d'échantillonnage 250 Méga-échantillons/s et de mémoire 50 kilo-octets.

CHAPITRE 3 : RESULTATS EXPERIMENTAUX

***EFFETS DE LA GEOMETRIE ET DE LA POLLUTION
SUR LA GENERATION DES STREAMERS DANS
L'HUILE MINERALE SOUS TENSION ALTERNATIVE***

Sommaire

<i>3.1 EFFETS DE LA GEOMETRIE SUR LA GENERATION DES STREAMERS</i>	73
<i>3.2 EFFETS DE LA POLLUTION</i>	83
<i>3.3 DISCUSSION ET CONCLUSIONS</i>	102

CHAPITRE 3 : EFFETS DE LA GEOMETRIE ET DE LA POLLUTION SUR LA GENERATION DES STREAMERS SOUS TENSION ALTERNATIVE

Dans ce chapitre, nous présentons une étude de la génération des streamers sous tension alternative. La longue durée d'application de la tension alternative présente un intérêt pratique et a pour conséquence que divers phénomènes tels que l'injection de charges d'espace, les mouvements du liquide et l'intervention des particules jouent un rôle important. Dans certaines conditions, l'apparition des streamers est caractérisée par une grande dispersion.

Ce travail constitue un prolongement des essais entrepris au LEMD lors d'une précédente collaboration avec la société Jeumont-Schneider Transformateurs (JST) et l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ) [IREQ95], concernant essentiellement la propagation des streamers sous tension alternative. Tout d'abord, nous étudions l'influence de la géométrie (rayon de courbure, distance inter-électrodes) dans l'huile avec un conditionnement fixe. Ensuite, une étude similaire sera effectuée en présence de divers polluants (particules, eau).

Finalement, nous présentons une étude de la tension de claquage afin de déterminer les conditions de génération en champ quasi uniforme.

3.1 EFFETS DE LA GEOMETRIE SUR LA GENERATION DES STREAMERS

3.1.1 GENERALITES

3.1.1.1 Détection des streamers

Les streamers ont été détectés par la lumière émise à l'aide d'un photomultiplicateur. La sensibilité du photomultiplicateur est suffisante, à la limite du bruit du fond, pour détecter tous les streamers négatifs et positifs générés. Le nombre des décharges a été compté séparément par deux fréquences numériques (compteurs) en polarité positive et négative (figure 2.9 §2.5.2).

3.1.1.2 Tension de génération des streamers

Sous tension alternative, il n'existe pas une tension seuil spécifique de génération. L'apparition des streamers est aléatoirement distribuée en fonction du temps. Il est donc nécessaire d'utiliser une méthode statistique, qui consiste à mesurer la dépendance de la fréquence d'apparition en fonction de la tension. Pour cela, des comptages de streamers ont été effectués en appliquant une tension constante pendant une certaine durée. La durée d'application doit être

suffisante pour obtenir un nombre significatif de décharges. Elle varie de quelques minutes à plusieurs heures selon les expérimentations.

La fréquence moyenne d'apparition des streamers est déterminée par le nombre de décharges accumulées pendant cette durée d'application de la tension. On désigne la fréquence moyenne d'apparition des streamers positifs par F^+ et celle des streamers négatifs par F^- . Dans la suite, F^+ et F^- sont exprimées en nombre de streamers générés par minute (mn^{-1}) et la tension appliquée en valeur crête dans le but de pouvoir aisément la comparer aux tensions instantanées d'apparition des streamers.

La figure 3.1 illustre un exemple de mesure.

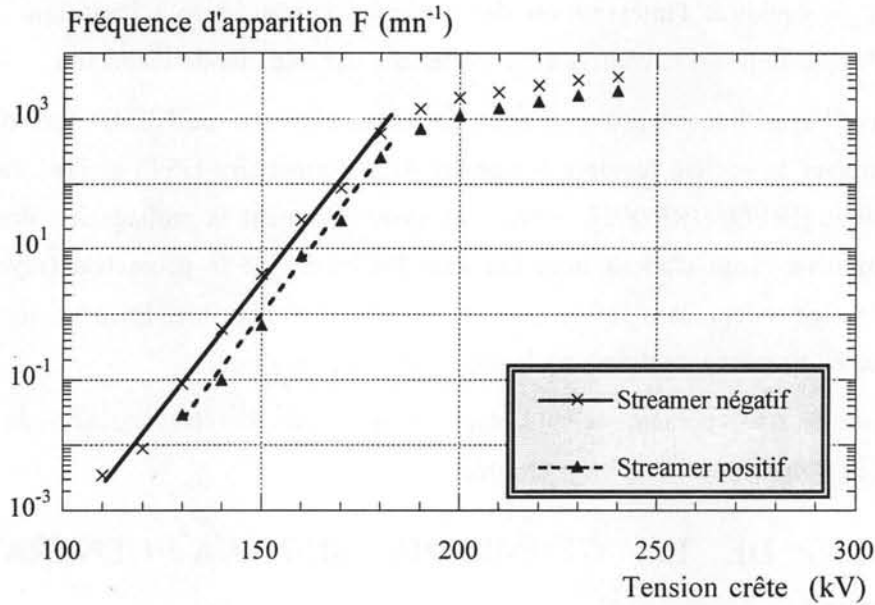


Figure 3.1: Exemple de mesure de la fréquence d'apparition de décharges dans l'huile de transformateur: $r_p=0,5$ mm, $d=40$ cm.

Nous pouvons remarquer :

- pour un certain intervalle de tension, l'augmentation de la fréquence d'apparition des streamers avec la tension est quasiment exponentielle;
- une tendance à la saturation de la fréquence d'apparition à des tensions élevées.

Aux très basses tensions, l'obtention de résultats significatifs nécessite des durées d'acquisition très longues. Pour mesurer des fréquences très faibles (de l'ordre $10^{-4}/mn$), il faut appliquer la tension pendant plusieurs dizaines d'heures. Par exemple, avec une tige de rayon $r_p=0,3$ mm et à la distance inter-électrodes $d=40$ cm, nous constatons qu'aucune décharge n'a été détectée pendant 30 heures d'application d'une tension de 90 kV; 4 décharges ont été générées pendant 20 heures à 95 kV; puis 8 décharges pendant 30 minutes lorsque la tension croît à 100 kV.

D'autre part, aux tensions élevées, une fréquence d'apparition importante des streamers dégrade fortement l'huile. Cette dégradation modifie l'état du liquide au voisinage de l'électrode

haute tension (apparition de bulles visibles). Les bulles modifient ensuite notablement les conditions d'apparition des streamers. Cet effet est plus marqué pour les grands rayons de courbure pour lesquels l'apparition des streamers s'effectue de manière irrégulière sous forme de "rafales" qui peuvent durer plusieurs secondes en formant un grand nombre de bulles.

Dans le but de conserver l'huile dans son état de conditionnement initial lors des essais, il est nécessaire d'éviter les claquages multiples en interrompant la tension immédiatement après la détection d'un claquage avec un relais électronique et de limiter le nombre de streamers.

Pour ces raisons, nous ne présenterons par la suite que des résultats avec une fréquence d'apparition acceptable, selon les conditions expérimentales : jusqu'à 10^4 mn^{-1} pour des pointes et quelques streamers par minute pour des grosses tiges.

3.1.2 GEOMETRIE POINTE-PLAN OU TIGE-PLAN

Cette étude a été effectuée avec un conditionnement fixe du liquide. Tous les essais (figures 3.1 à 3.10) ont été réalisés dans le même remplissage d'huile. Nous avons utilisé une huile sans traitement. Cette huile contient des particules de taille et de natures variables et une teneur en eau d'environ 20 ppm.

L'influence des paramètres géométriques (rayon de courbure et distance inter-électrodes) a été étudiée en mesurant la fréquence d'apparition des décharges en fonction de la tension appliquée. Dans ces expériences, nous avons utilisé les électrodes haute tension, allant des pointes de rayon d'une dizaine de μm aux tiges de rayon jusqu'à 10 mm. La distance inter-électrodes varie de 10 cm à 40 cm. Nous avons également effectué des essais avec une tige de $r_p = 20 \text{ mm}$ et une sphère de rayon de 32 mm. Dans ce cas, pour des grandes distances inter-électrodes ($d > 30 \text{ cm}$), aucun streamer n'a été détecté à la tension maximale de 450 kV crête, même dans une huile très contaminée. Pour des faibles distances (moins de 5 cm), les streamers une fois générés, conduisent immédiatement au claquage, ce qui ne permet pas de mesurer des fréquences d'apparition.

Par ailleurs, les mesures ont été réalisées en présence de mouvements d'huile par agitateurs pour obtenir une distribution des particules stable et homogène.

3.1.2.1 Observations

Au cours des essais, à cause de la longue durée d'application de la tension, l'érosion des pointes fines (dizaines de μm) par les streamers a été observée. Par exemple, une pointe de $r_p = 10 \mu\text{m}$ passe à 15 μm après quelques heures de mesure.

Pour des tiges de grand rayon de courbure, la génération des streamers est très aléatoire et la dispersion des mesures est plus importante. Les streamers apparaissent sous forme de "rafales"

dans lesquelles les streamers positifs et négatifs se succèdent de manière systématique [IREQ95, LESA98a].

3.1.2.2 Influence du rayon de courbure de l'électrode

Les figures 3.2 et 3.3 montrent la fréquence d'apparition des streamers en fonction de la tension pour différents rayons de courbure de l'électrode.

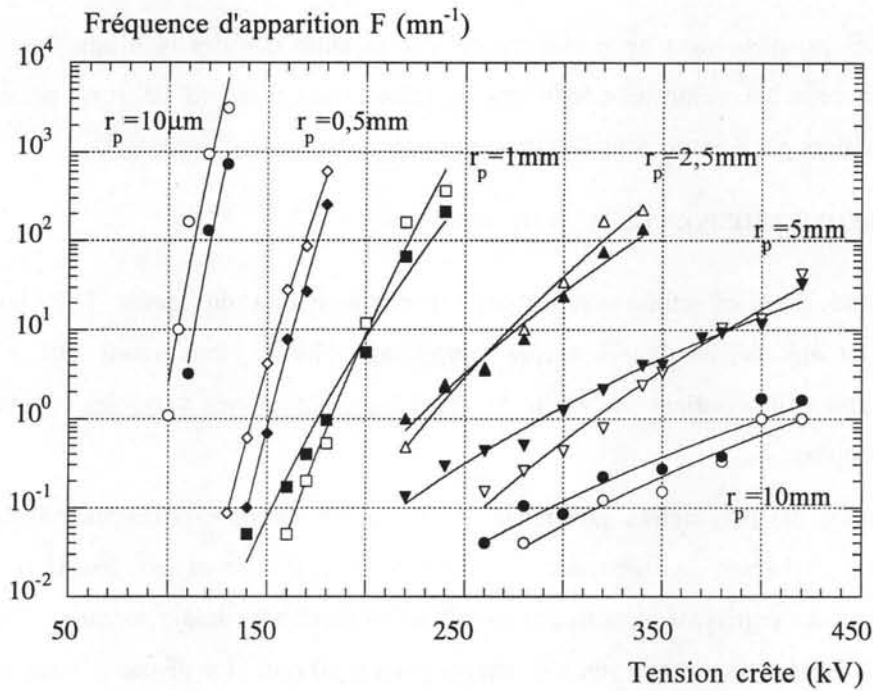


Figure 3.2: Fréquence d'apparition des streamers en fonction de la tension appliquée pour différents rayons de courbure de l'électrode. Distance inter-électrodes $d = 40\text{cm}$. Streamer positif en point noircis et streamer négatif en point creux.

Nous pouvons remarquer que la fréquence d'apparition des streamers varie de façon comparable dans les deux polarités avec différentes tailles d'électrodes. Avec des pointes fines, nous avons observé que les premiers événements lumineux apparaissent au sommet de la demi-alternance négative de la tension. Les streamers positifs sont générés à des tensions plus élevées. Cette situation s'inverse progressivement lorsqu'on augmente r_p . La fréquence d'apparition des streamers augmente quasiment exponentiellement avec la tension.

Lorsque le rayon de courbure de l'électrode augmente, nous constatons une augmentation de la tension d'apparition et également un accroissement moins rapide du nombre de streamers avec la tension (la pente de l'exponentielle diminue).

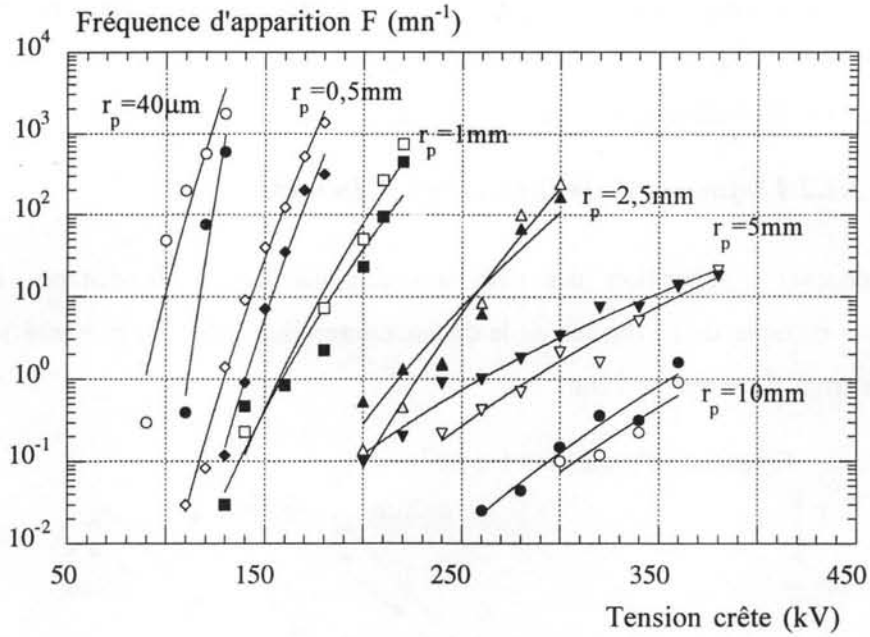


Figure 3.3: Influence du rayon de courbure sur la fréquence d'apparition des streamers en fonction de la tension pour une distance inter-électrodes $d = 30\ \text{cm}$. Streamer positif en point noircis et streamer négatif en point creux.

La proportion des streamers négatifs par rapport au nombre total de décharges varie selon le rayon de courbure et la tension (figure 3.4).

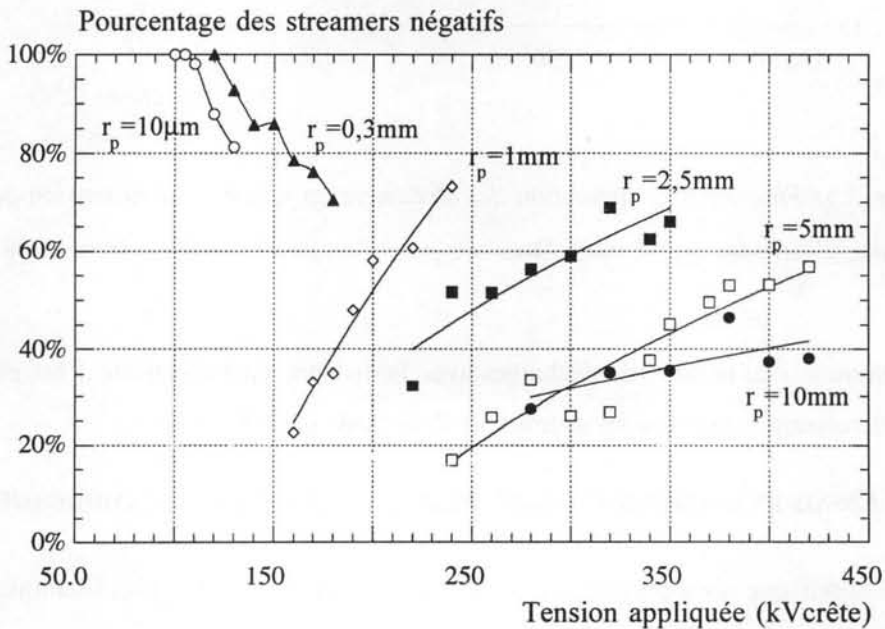


Figure 3.4: Pourcentage des streamers négatifs au nombre total des streamers sous tension alternative dans l'huile ($d = 40\ \text{cm}$).

La répartition du nombre des streamers négatifs s'établit à environ 65-75% des streamers générés.

Avec des tiges (rayon de quelques mm), on a remarqué que les streamers apparaissent sous forme de "rafales". Dans ces conditions, les comptages réalisés donnent les proportions des streamers négatifs et positifs générés dans les rafales.

3.1.2.3 Influence de la distance inter-électrodes

La fréquence d'apparition des streamers diminue lorsque la distance inter-électrodes augmente. Un exemple de l'influence de la distance inter-électrodes est présenté sur la figure 3.5 pour une électrode de rayon de 1 mm.

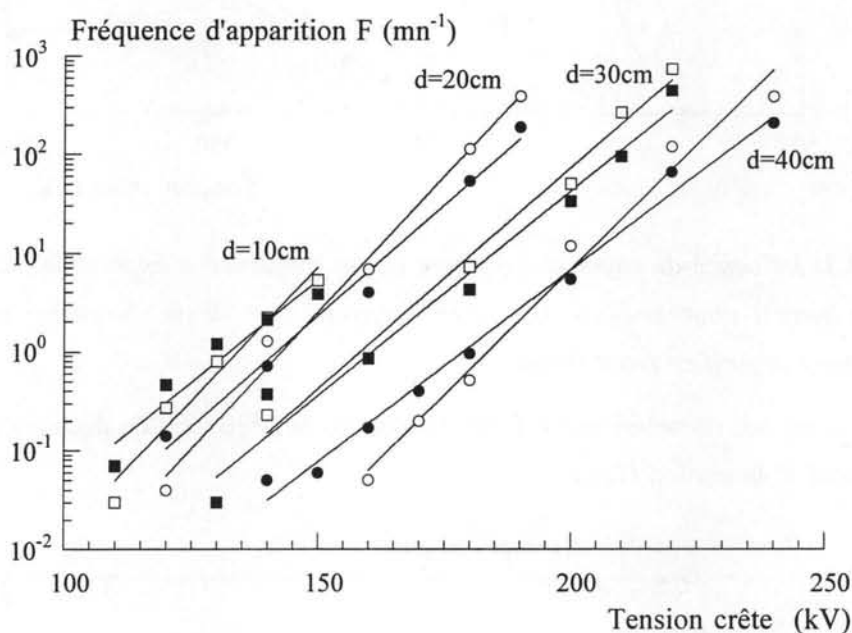


Figure 3.5: Fréquence d'apparition des streamers en fonction de la tension pour différentes distances inter-électrodes ($r_p = 1$ mm). Streamer positif en point creux et streamer négatif en point noircis.

La diminution du nombre de décharges avec la distance inter-électrode d est expliquée par la diminution du champ maximum au sommet de l'électrode (voir § 3.1.4).

3.1.3 ESSAIS EN GEOMETRIE SPHERE-PLAN AVEC ELECTRODE D'AMORÇAGE

Les résultats que nous présentons dans cette géométrie ont été précédemment obtenus par MM Saker et Gournay [IREQ95]. Ce système comporte une électrode sphérique de diamètre de 14 cm avec un fil d'amorçage fixé sur la sphère de longueur h et de rayon r_p ajustable. Cette configuration d'électrodes est proche de la géométrie semi-uniforme présentée au § 1.2 (voir également 4^e chapitre).

Les influences du rayon et de la longueur du fil d'amorçage sont similaires à celles rapportées en géométrie semi-uniforme sous tension impulsionnelle (voir chapitre 4). Plus le rayon de l'électrode d'amorçage est faible et plus la longueur du fil est importante, plus les streamers sont faciles à générer.

Un exemple de résultat est rapporté sur la figure 3.6. Comme en géométrie pointe-plan, la fréquence d'apparition des décharges augmente exponentiellement avec la tension.

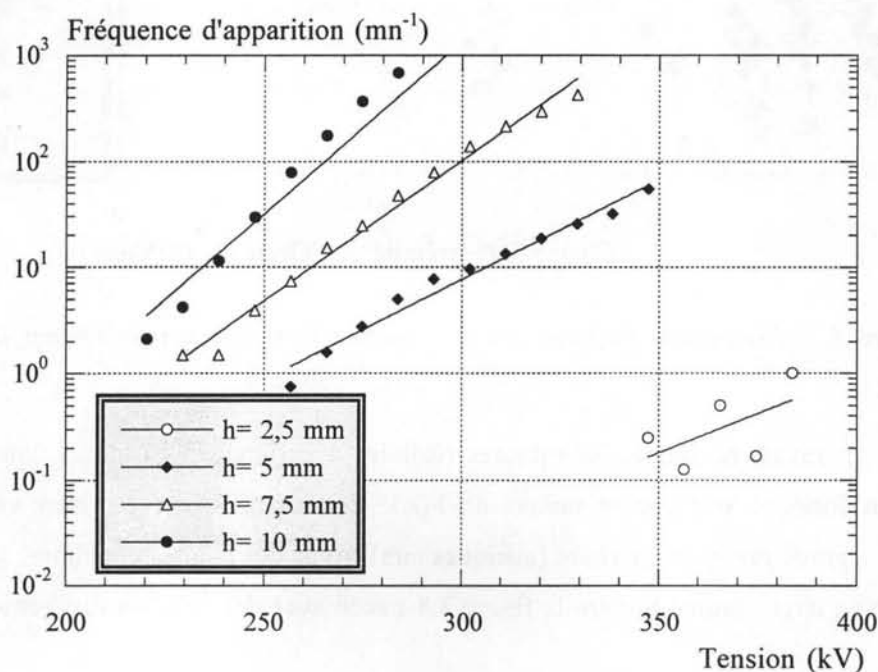


Figure 3.6: Influence de la longueur du fil d'amorçage sur la fréquence d'apparition des streamers ($d = 30$ cm, $r_p = 50$ μ m).

3.1.4 CHAMP DE GENERATION DES STREAMERS

3.1.4.1 Fréquence d'apparition des streamers en fonction du champ

La figure 3.7 montre la fréquence d'apparition des streamers en fonction du champ à l'extrémité de l'électrode pour différents rayons de courbure.

Le champ au sommet de l'électrode a été calculé de deux manières différentes :

- analytiquement avec l'approximation hyperboloïdale pour les pointes;
- numériquement à l'aide du logiciel CSP pour les tiges.

Dans ces calculs, on suppose une absence de charges spatiales. Nous verrons plus loin que cette hypothèse n'est pas toujours justifiée.

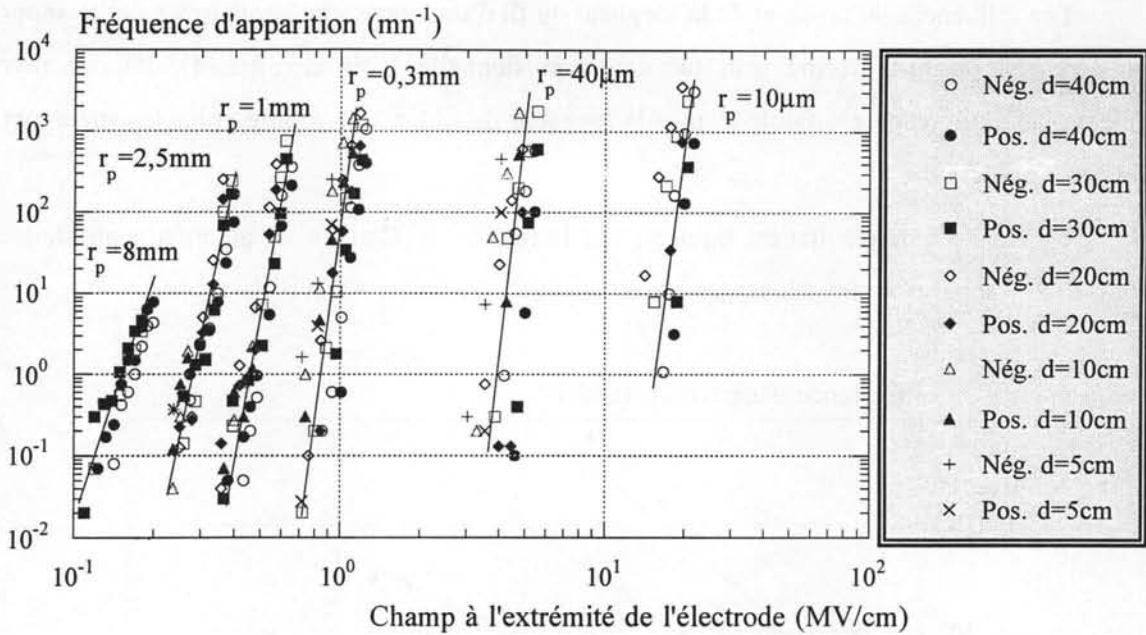


Figure 3.7: Fréquence d'apparition des streamers en fonction du champ à l'extrémité de l'électrode.

Pour un rayon r_p donné, les mesures réalisées à différentes distances inter-électrodes se regroupent en formant une courbe unique de $F(E)$. Cette conclusion est bien vérifiée pour les électrodes de grand rayon de courbure (quelques mm). Avec des pointes plus fines, la dispersion est nettement plus large comme montre la figure 3.8 tracée avec des échelles différentes.

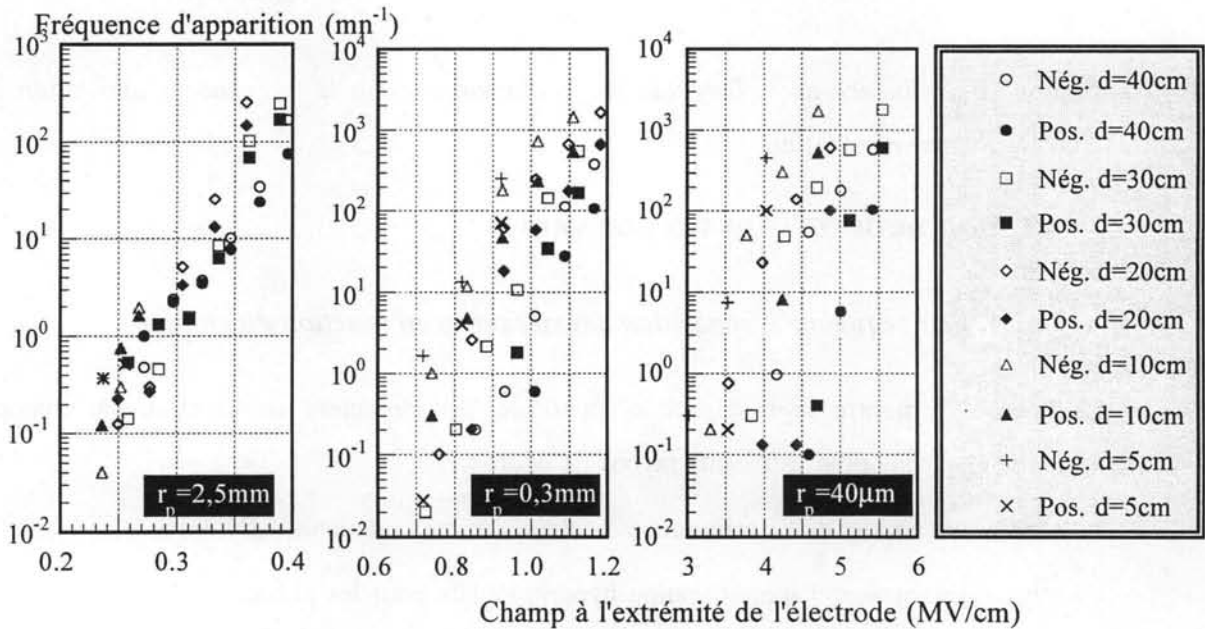


Figure 3.8: Fréquence d'apparition des streamers en fonction du champ à l'extrémité de l'électrode de rayon $r_p = 40 \mu\text{m}$; $r_p = 0,3 \text{ mm}$ et $r_p = 2,5 \text{ mm}$.

Les fréquences d'apparition des streamers augmentent exponentiellement avec le champ sur l'électrode. Pour une fréquence d'apparition fixe, le champ diminue régulièrement lorsque l'on augmente le rayon de courbure de l'électrode, comme il a été observé sous impulsions de tension [GOUR94a] (voir aussi la figure 4.19 au 4^e chapitre) et sous tension alternative [LESA87].

En géométrie sphère-plan avec l'électrode d'amorçage, la même tendance est observée. Pour une électrode d'amorçage de rayon fixe, les courbes de la fréquence d'apparition avec différentes longueurs du fil se groupent pour former une courbe unique comme il est montré sur la figure 3.9.

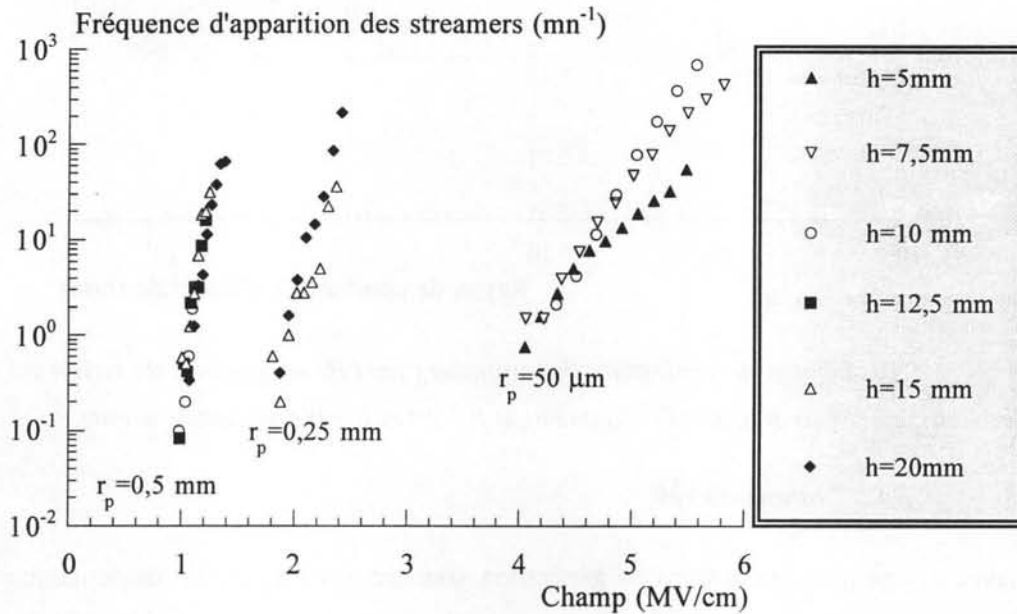


Figure 3.9: Fréquence d'apparition des streamers F^+ et F^- en fonction du champ à l'extrémité de l'électrode d'amorçage [IREQ95, LESA98a].

3.1.4.2 Influence du rayon de courbure

Le champ de génération des streamers calculé à une fréquence donnée varie de même manière dans les deux polarités.

La figure 3.10 montre le champ de génération des streamers E_g en fonction du rayon de courbure de l'électrode pour deux fréquences d'apparition $F = 10$ et $F = 0,1$ streamers par minute.

Le champ de génération diminue avec le rayon de courbure de l'électrode mais les diminutions de $E_g(r_p)$ ne sont pas identiques pour des petits et grands rayons de courbure. Pour des pointes de faible rayon de courbure ($r_p \leq 100 \mu\text{m}$), la diminution du champ est plus rapide que pour des tiges. Sur cette figure, nous rapportons également la variation du champ de génération $E_g(r_p)$ mesuré au chapitre 4 sous impulsions de tension en l'absence de charge d'espace (figure 4.19 § 4.1.5.3).

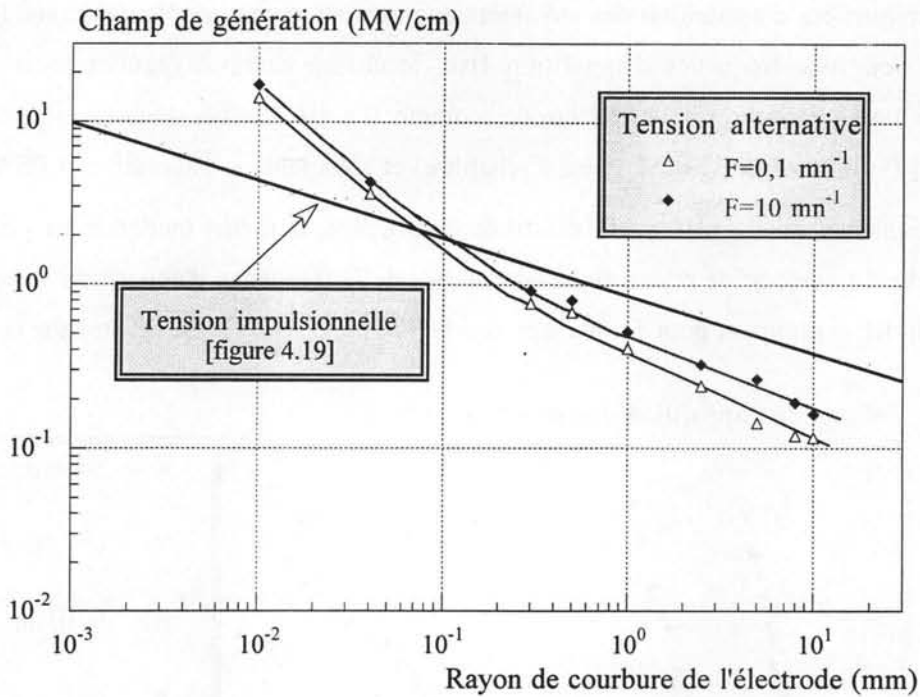


Figure 3.10: Champ de génération des streamers positifs en fonction du rayon de courbure de l'électrode pour deux fréquences d'apparition $F=10$ et $F=0,1$ streamer/minute.

3.1.4.3 Commentaires

Avec des pointes, les champs de génération sous tension alternative deviennent nettement supérieurs à ceux mesurés sous tension impulsionnelle. Cela est d'autant plus marqué que le rayon de la pointe est faible.

Pour les grosses tiges ($r_p > 1 \text{ mm}$), les streamers sous tension alternative apparaissent à des champs plus faibles que ceux mesurés sous tension impulsionnelle, et la variation relative de $E_g(r_p)$ devient comparable (les courbes deviennent pratiquement parallèles). L'écart entre les valeurs mesurées sous tension impulsionnelle et sous tension alternative est comparable à celui observé sur la tension de claquage (voir par exemple la figure 1.11). Cet écart dépend de la fréquence d'apparition considérée sous tension alternative. Comme nous verrons au chapitre 4, cet écart peut être expliqué par la durée d'application de la tension beaucoup plus longue sous tension alternative.

Les valeurs du champ calculées avec des pointes fines (jusqu'à 20 MV/cm) sont anormalement élevées. Cet effet est certainement dû à l'injection de charges qui limite le champ réel à la pointe, et conduit à fortement surestimer le champ E_g si on calcule le champ en l'absence de charge.

La figure 3.10 indique que l'effet de limitation du champ par la charge d'espace est très comparable dans les deux polarités. Il semble que l'effet devient non négligeable pour un champ E_g supérieur à environ 400 kV/cm.

Il apparaît donc que sous tension alternative, le champ sur des pointes de rayon $r_p < 1$ mm est dominé par l'influence des charges injectées. Par conséquent, on ne peut pas extrapoler les résultats obtenus dans ces géométries (influence de l'eau et des particules) au cas de claquage dans les applications dans lesquelles le champ est beaucoup plus faible. Dans la suite, seules les mesures réalisées avec des électrodes de rayon $r_p > 1$ mm seront donc considérées comme utilisables pour estimer l'influence de l'eau et des particules.

3.2 EFFETS DE LA POLLUTION

Dans le but d'étudier le rôle joué par les polluants, nous avons ajouté des quantités connues de particules et d'eau à de l'huile bien filtrée et déshydratée (huile de référence) par la méthode décrite au § 2.4. La nature des particules sélectionnées (cuivre, aluminium, carbone et cellulose) correspond à celle des particules trouvées dans certaines applications industrielles telles que les transformateurs de puissance.

3.2.1 EFFET DES PARTICULES

3.2.1.1 Influence des particules métalliques

a) Particules de cuivre

Dans notre cellule, les mesures réalisées lors d'une étude précédente [IREQ95] avaient montré que la mise en suspension des particules métalliques est difficile à maîtriser en raison de la sédimentation. Les particules de cuivre utilisées (diamètre de 2 à 15 μm) se déposent quelques minutes après l'addition dans la cellule. Avec le système de brassage à hélices, il est impossible de les maintenir en suspension. Même en présence d'une forte agitation, le dépôt des particules est visible au fond de la cellule dans les zones où le mouvement d'huile n'est pas assez violent. Ces endroits forment donc des zones pièges dans lesquelles les particules s'accablent rapidement.

b) Particules d'aluminium

Dans notre étude, nous avons réalisé des essais avec des particules d'aluminium en raison de leur plus faible densité (3 fois plus légères que le cuivre). Elles proviennent d'une poudre d'aluminium (Aluminum powder Jonhson Matthey # 10576 B) composée de particules de forme sphérique (diamètre maximum de 20 μm). Dans ces conditions, on s'attend à ce que les particules puissent se maintenir plus longtemps en suspension.

Observation

Même avec ces particules plus légères, la sédimentation reste assez rapide. Le dépôt a été observé après quelques dizaines de minutes comme avec le cuivre, il est impossible de décoller les

particules du fond de la cellule et de les remettre en suspension à l'aide du système de brassage décrit au §2.2.

En appliquant une tension d'amplitude croissante, nous avons observé que des particules déposées depuis 24 heures, sont repoussées par l'agitation électrohydrodynamique du liquide, les particules glissent du centre vers l'extérieur du plan. Pour des tensions élevées, on constate également que certaines particules décollent et circulent dans le liquide.

Afin de remédier à la sédimentation, nous avons essayé diverses procédures en changeant périodiquement le sens et la vitesse de rotation des agitateurs. Cette mesure n'a pas produit d'effet notable. Pour remettre temporairement en suspension les particules, l'aspiration des particules déposées sur le plan a été effectuée à l'aide d'une pompe extérieure.

Fréquence d'apparition et sédimentation

Un gramme de poudre d'Al a été ajouté dans la cellule. En appliquant une tension constante, nous avons constaté que la fréquence d'apparition des streamers diminue rapidement au cours du temps. Sur la figure 3.11, nous avons rapporté la mesure du nombre de décharges générées $N(t)$ en fonction du temps sous des conditions fixées ($r_p=2,5$ mm, $d=40$ cm et $V=180$ kV).

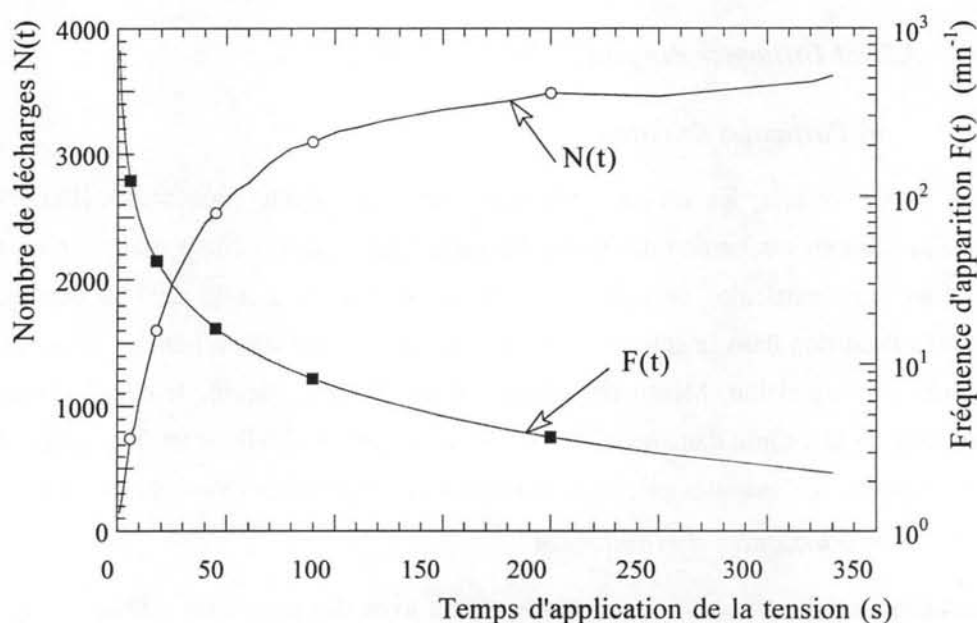


Figure 3.11: Variation du nombre de décharges accumulées $N(t)$ et de la fréquence d'apparition des streamers $F(t)$ en fonction du temps. Huile filtrée + 1 g de poudre d'aluminium ($r_p=2,5$ mm, $d=40$ cm, $V=180$ kV).

La dérivation de la courbe $N(t)$ représente la fréquence d'apparition des streamers $F(t)$. La diminution de la fréquence d'apparition de décharges s'explique par la diminution dans le temps de la concentration des particules métalliques en suspension (sédimentation). Le champ, pour la tension de 180 kV, ne peut pas empêcher les particules de se déposer. La fréquence d'apparition

des streamers $F(t) = dN(t)/dt$ chute d'abord très rapidement pour atteindre quelques streamers par minute à la fin des mesures.

Après une journée de repos, toutes les particules d'aluminium ont été déposées. Dans cet état, nous avons mesuré une augmentation remarquable de la fréquence d'apparition des streamers présentée sur la figure 3.12.

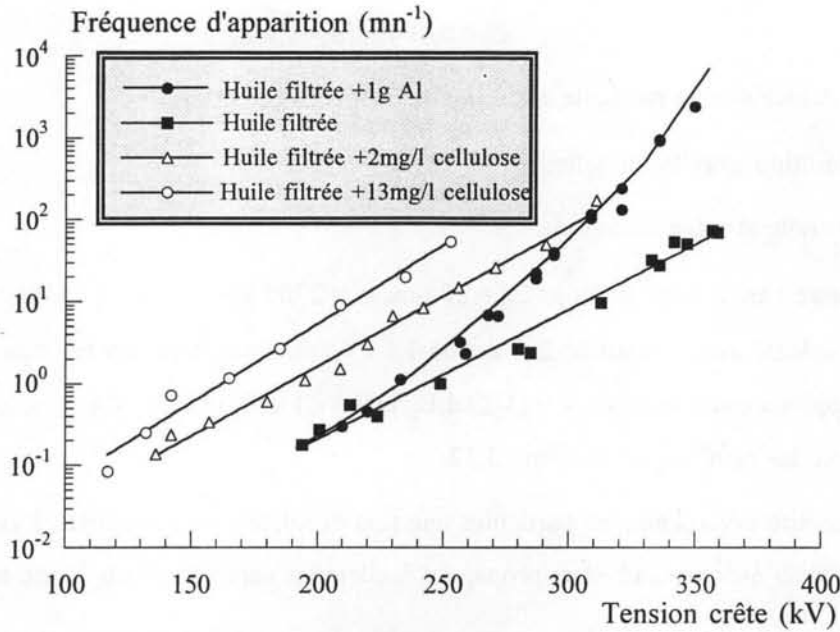


Figure 3.12: Fréquence d'apparition des streamers positifs dans l'huile de transformateur avec divers types de pollution: $r_p = 2,5$ mm, $d = 40$ cm. Les mesures avec les particules Al ont été réalisées après 24 heures de repos. Teneur en eau $\varphi = 33$ ppm.

Pour des tensions relativement basses (au-dessous de 200 kV pour $r_p = 2,5$ mm, $d = 40$ cm sur la figure 3.12), la fréquence d'apparition des streamers dans l'huile avec les particules d'aluminium à l'état de repos et celle mesurée dans l'huile filtrée sont identiques.

Sous tension plus élevée, le décollement des particules d'aluminium et leur influence sur la génération des décharges peuvent être observés. L'accroissement plus rapide de $F(V)$ dans le cas des particules Al s'explique par l'intervention des particules métalliques qui se soulèvent sous l'action du champ. En outre, il est intéressant de noter que la présence des particules d'aluminium tend à diminuer la proportion de décharges négatives de 65% - 70% (huile propre) à 20% de l'ensemble des décharges.

Sur la figure 3.12, nous avons rapporté également les résultats obtenus avec des conditions identiques dans l'huile contaminée par des particules de cellulose. Aux faibles tensions, la fréquence d'apparition avec des particules métalliques déposées, est beaucoup plus faible que celle mesurée dans l'huile avec des particules de cellulose. En revanche, l'augmentation de la fréquence d'apparition avec la tension $F(V)$ est plus rapide avec des particules conductrices.

Interprétation

L'étude du comportement d'une particule métallique unique en géométrie uniforme sous tension continue montre que celle-ci se charge et peut se soulever si le champ est supérieur à une certaine valeur E_s . Selon Tobazéon [TOBA96b], une particule conductrice de forme sphérique de rayon r_o se soulève pour le champ E_s égal à :

$$E_s = 0,494[r_o(\rho_s - \rho_l)g/\epsilon]^{1/2} \quad (\text{Eq. 3. 1})$$

ρ_s et ρ_l densités de la particule et du liquide respectivement ;

g accélération gravitationnelle;

ϵ permittivité absolue du liquide.

Dans notre cas, si nous prenons $2r_o = 20 \mu\text{m}$, $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_l = 855 \text{ kg/m}^3$, le champ de soulèvement calculé avec l'équation 3.1 est de 1,5 kV/cm. Pour créer un tel champ au niveau du plan, il faut appliquer une tension $V = (1/2).d.E_p \ln(4d/r_p)$ soit 192 kV. Cette valeur est en bonne corrélation avec les résultats de la figure 3.12.

En géométrie divergente, les particules une fois décollées, sont soumises à un champ de plus en plus fort. Par conséquent, elles se propagent facilement vers l'électrode haute tension.

Ces mesures montrent l'influence remarquable des particules conductrices sur la génération des streamers, même quand celles-ci se trouvent sur une électrode connectée à la masse. L'influence est encore plus importante lorsqu'elles sont sur l'électrode haute tension ou dans son voisinage. Ces particules favorisent l'apparition des streamers et réduisent la tension de claquage.

c) Particules de carbone

Des mesures ont été précédemment réalisées en additionnant du noir de carbone à de l'huile filtrée [IREQ95]. Ce noir de carbone est composé de particules très fines de taille moyenne de $0,05 \mu\text{m}$. L'addition de noir de carbone en grande quantité n'augmente pas la fréquence d'apparition des streamers, comme l'indique la figure 3.13. Un effet inverse est plutôt observé (légère diminution de la fréquence de décharges).

Cet effet est lié à la faible taille des particules de carbone. En effet, dans les travaux antérieurs, lors de l'étude de l'influence des particules sur la rigidité diélectrique des liquides, il a été établi que les particules métalliques de taille de 2 à $5 \mu\text{m}$ ont beaucoup moins d'effet que les grosses particules [KAKO86].

Avec l'addition de particules de graphite de tailles plus grandes (jusqu'à $50 \mu\text{m}$), cette hypothèse est vérifiée, car la fréquence de décharges augmente notablement (voir figure 3.13).

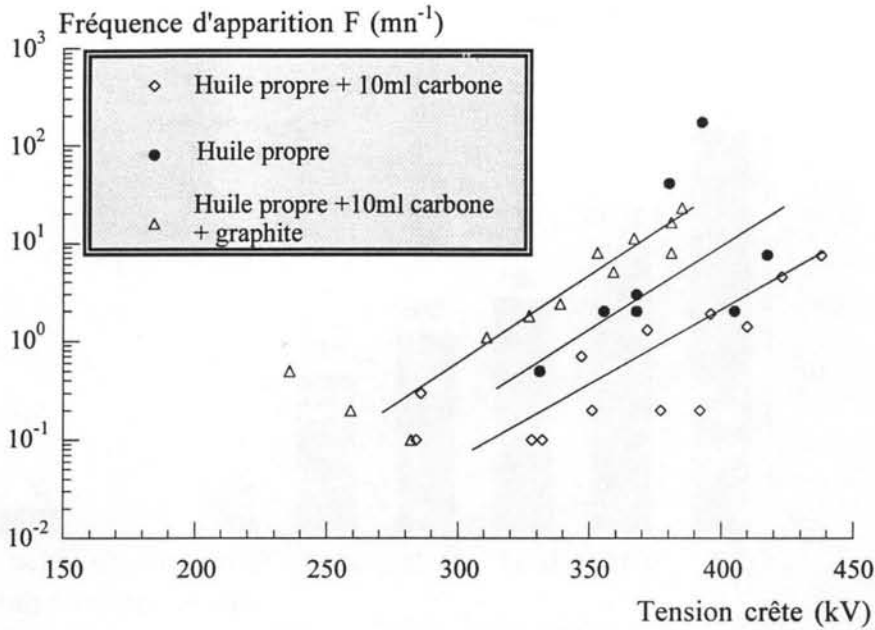


Figure 3.13: Mesures de fréquence d'apparition des streamers avant et après addition de 10 ml de solution de noir de carbone (soit 60 μg de carbone par litre, puis 1 cm^3 de poudre de graphite) $r_p = 4 \text{ mm}$, $d = 35 \text{ cm}$ [d'après IREQ95].

3.2.1.2 Influence des particules de cellulose

a) Généralités

Forme et taille des particules

Le choix des particules de cellulose est fondé sur le fait que dans les transformateurs de puissance, l'huile est toujours utilisée en combinaison avec des solides diélectriques (carton, bois). Les particules de cellulose, ajoutées dans la cellule proviennent du défibrage de carton de transformateur. Leurs formes peuvent être très diverses mais elles sont toujours composées de fibres allongées de 3 mm de longueur maximale et de diamètre variant jusqu'à 80 μm .

Suspension des particules

La mise en suspension des particules de cellulose a posé moins de problèmes que celle des particules métalliques. Grâce à une densité proche de celle de l'huile, les fibres de cellulose se déposent très lentement. Après une longue durée de repos, il suffit de mettre en route les hélices pour décoller les particules sédimentées et pour les maintenir en suspension pendant l'essai.

Comptage des particules

Le nombre des particules dans l'huile a été déterminé par comptage à la société Jeumont-Schneider Transformateurs. Les résultats du comptage avec différents niveaux de pollution sont présentés sur la figure 3.14 et dans le tableau 3.1.

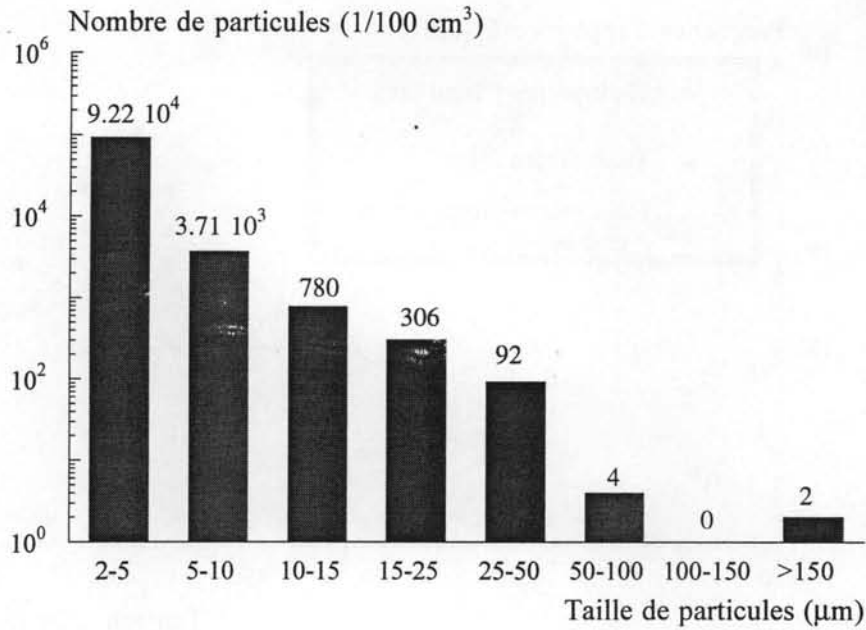


Figure 3.14: Exemple de la distribution des tailles de particules de cellulose dans une huile fortement contaminée.

Tableau 3.1 Comptage des particules de cellulose dans différentes huiles

Taille de particules (µm)	Huile filtrée	Huile filtrée + 0,7 mg cellulose par litre	Huile filtrée + 13 mg cellulose par litre	Huile filtrée + 18 mg cellulose par litre	Huile filtrée + 70 mg cellulose par litre
2 -5	252	748	7898	9690	16316
5-10	20	34	194	6060	806
10-15	4	16	34	56	76
15-25	2	8	24	18	18
25-50	1	4	10	6	6
50-100	0	2	4	4	5
100-150	0	0	2	0	0
>150	0	0	2	0	0

Dans la plupart des prélèvements, nous constatons que la majorité des particules sont d'une taille inférieure à 5 µm. En règle générale, la distribution des particules par leur taille suit une loi logarithmique [TRIN82, OOME83]. Nous remarquons une teneur faible en particules de taille de 2-5 µm dans l'huile bien filtrée, ce qui montre l'efficacité du système de filtration.

On remarque que l'efficacité du système de comptage utilisé n'est pas bonne dans le cas des fibres de cellulose : il n'y a pas de proportionnalité entre la quantité de cellulose ajoutée et le comptage, et celui-ci n'indique pas de taille $>150 \mu\text{m}$ alors que des fibres de plusieurs mm sont présentes. Dans le cas des particules filiformes, le compteur utilisé donne une taille qui correspond à celle de particules sphériques de même surface apparente. Par conséquent, les indications de taille sont peu significatives.

Pour ces raisons, nous n'avons pas utilisé les résultats de comptage pour mesurer la quantité de particules et nous exprimerons dans la suite la teneur en particules de cellulose en milligramme de fibres sèches ajoutées par litre d'huile.

b) Visualisation du mouvement des particules

Le comportement des particules de cellulose a été observé et enregistré par ombroscopie avec un fort grandissement pour deux tiges arrondies de 0,5 mm et 2 mm de rayon. Les points remarquables observés lors de ces essais sont les suivants :

Huile filtrée.

Dans l'huile filtrée, nous n'avons observé aucun mouvement permanent des particules. Ceci est dû, d'une part, à la faible densité des particules dans l'huile filtrée et d'autre part, au fait que les particules de très petites tailles (moins de $5 \mu\text{m}$) sont difficiles à visualiser.

En présence de fibres de cellulose

En l'absence de champ électrique, les particules de cellulose sont entraînées par l'agitation de l'huile. Leurs déplacements sont désordonnés.

Sous l'action de la force diélectrophorétique, l'accumulation de particules sur l'électrode est nettement observée dès les plus basses tensions appliquées. Sur la figure 3.15, nous observons des fibres de cellulose à la surface d'une tige de rayon de 2 mm à la tension de 50 kV.

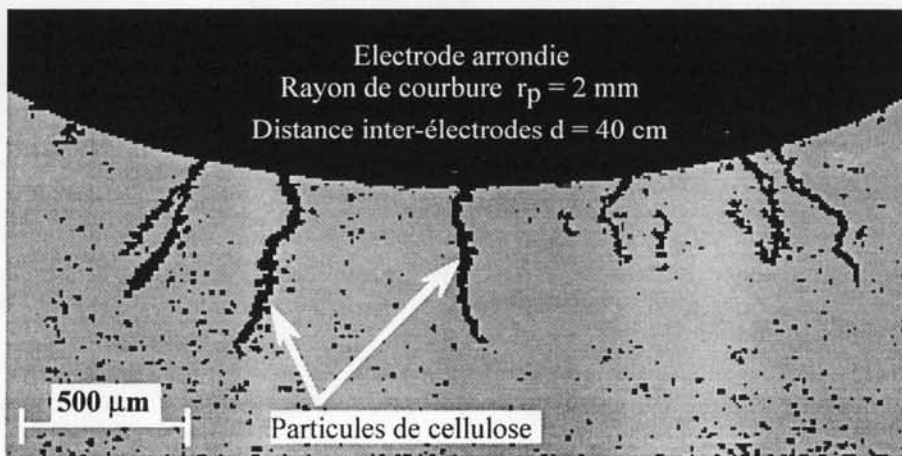


Figure 3.15: Accumulation de particules de cellulose sur une électrode arrondie $r_p = 2,0 \text{ mm}$, $d = 40 \text{ cm}$, $V = 50 \text{ kV}$.

L'orientation et l'accumulation des particules ont été observées à partir de tensions faibles, largement inférieures aux tensions d'apparition des streamers. Sur l'électrode, les particules sont quasiment perpendiculaires à la surface et restent de façon permanente. Elles ne sont pas immobiles mais se déplacent lentement le long de la surface.

Lorsqu'on augmente la tension, le mouvement des particules devient de plus en plus rapide et certaines particules sont, après quelques rebonds, rapidement éjectées hors de la zone de visualisation.

Pour des tensions plus élevées, les premières décharges apparaissent. La génération des streamers est corrélée à des mouvements très brefs et violents des particules, et entraîne la formation d'un grand nombre de bulles.

Lors du contact d'une particule de cellulose avec l'électrode, aucune décharge n'est détectée par le photomultiplicateur comme cela a été observé avec des particules métalliques [DAKI69, BIRL76, RAIN92, TOBA96a, CARR95]. Nous supposons que la charge acquise par une particule isolante est beaucoup plus faible que dans le cas des particules métalliques de taille millimétrique. Si une telle micro-décharge se produit, la lumière émise est inférieure à la sensibilité du PM. Nous avons également utilisé une caméra très sensible composée de deux intensificateurs mis en série. De même, ce dispositif de détection n'a pas permis de visualiser ces décharges. Lors des essais avec une tige de rayon $r_p = 0,5$ mm, nous avons détecté quelques points lumineux permanents sur la surface de l'électrode, qui peuvent se déplacer le long de la surface. Cependant, il est difficile de conclure s'il s'agit de microdécharges entre une particule et l'électrode ou de phénomènes d'électroluminescence de l'huile.

c) Influence du mouvement de l'huile

Nous avons mesuré la fréquence d'apparition des décharges en faisant varier la vitesse de rotation des agitateurs. Les résultats sont rapportés sur la figure 3.16

La fréquence d'apparition des décharges a été mesurée dans une huile contenant 0,7 mg/l de fibres de cellulose et une teneur en eau de 17 ppm.

Nous constatons qu'il n'y a pas d'effet notable du mouvement de l'huile sur la génération des streamers. Même en l'absence de mouvement, la distribution des particules dans l'huile est homogène, la sédimentation étant négligeable avec la cellulose.

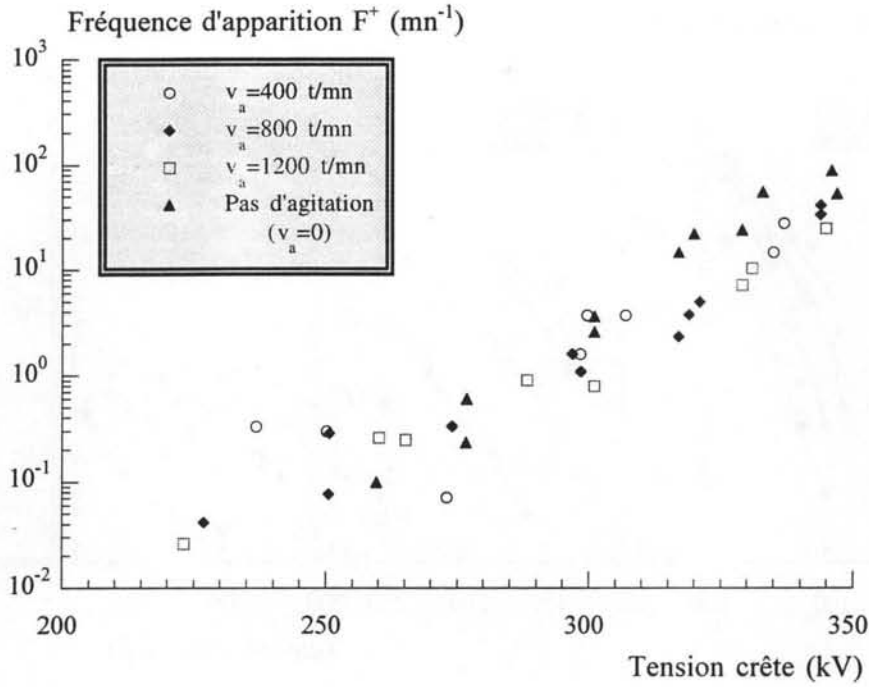


Figure 3.16: Fréquence d'apparition des streamers pour différentes vitesses de rotation des agitateurs ($r_p = 2,5$ mm, $d = 40$ cm).

d) Fréquence d'apparition des streamers

L'évolution des courbes $F(V)$ dans les deux polarités sont identiques avec différentes distances inter-électrodes d (de 10 cm jusqu'à 40 cm). Pour cela, nous présentons essentiellement les résultats concernant les streamers positifs pour une distance inter-électrode $d = 40$ cm.

Des exemples de mesures de la fréquence d'apparition des streamers réalisées en additionnant des fibres de cellulose préalablement déshydratées dans de l'huile filtrée (teneur en eau $\varphi = 17$ ppm) sont présentés sur les figures 3.17 et 3.18.

D'autres exemples avec des teneurs en eau plus élevées ($\varphi = 26$ ppm et $\varphi = 35$ ppm) sont montrés sur les figures 3.19 et 3.20. Lors de ces essais, nous avons noté que le taux des premiers streamers négatifs générés diminue lorsque l'on ajoute plus de particules et d'eau (environ 20% au lieu de 65% dans l'huile filtrée).

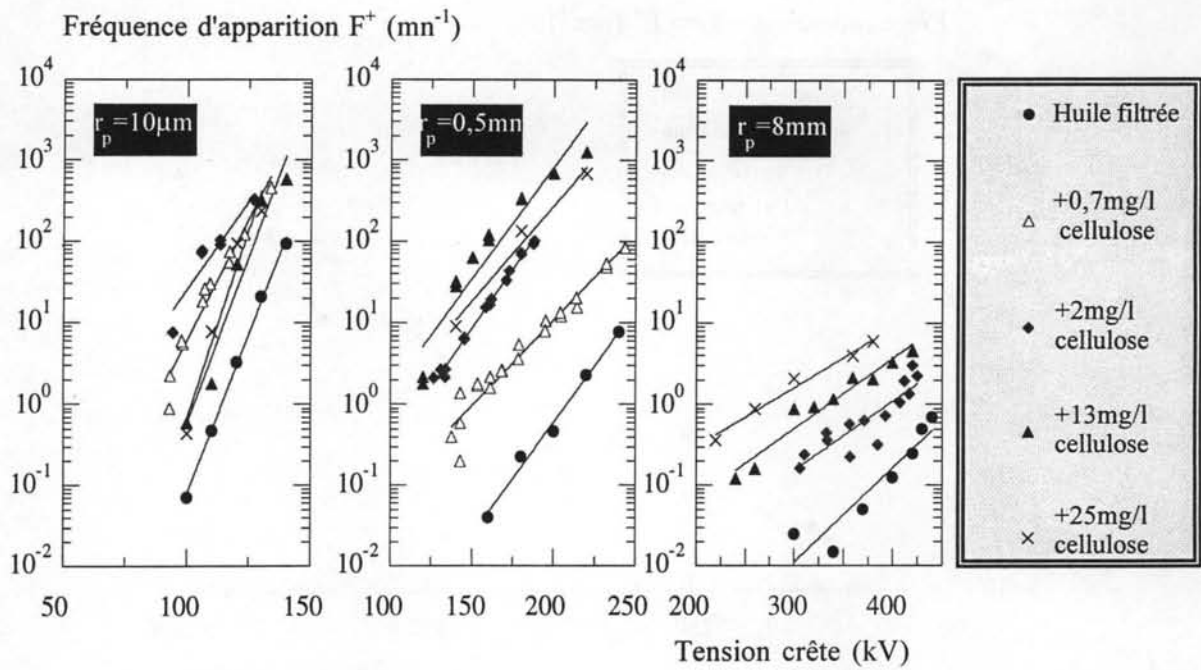


Figure 3.17: Influence des particules de cellulose sur la fréquence d'apparition des streamers positifs dans l'huile avec différentes teneurs en cellulose ($d = 40 \text{ cm}$, $\varphi = 17 \text{ ppm}$).

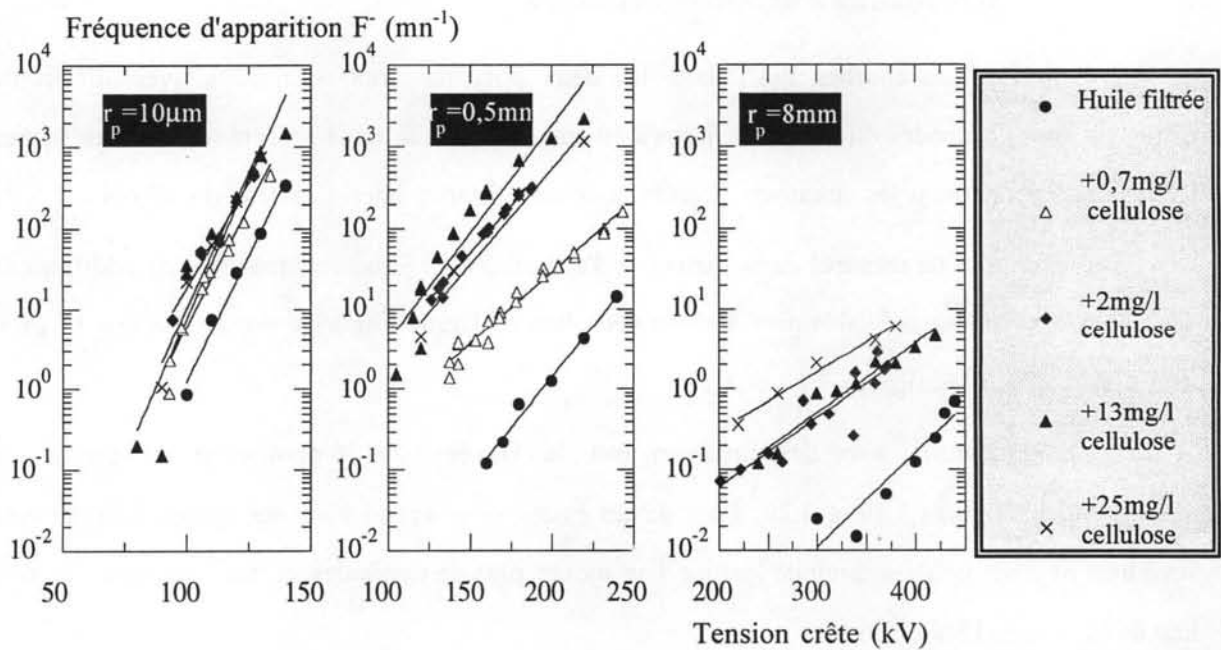


Figure 3.18: Influence des particules de cellulose sur la fréquence d'apparition des streamers négatifs dans l'huile avec différentes teneurs en cellulose ($d = 40 \text{ cm}$; $\varphi = 17 \text{ ppm}$).

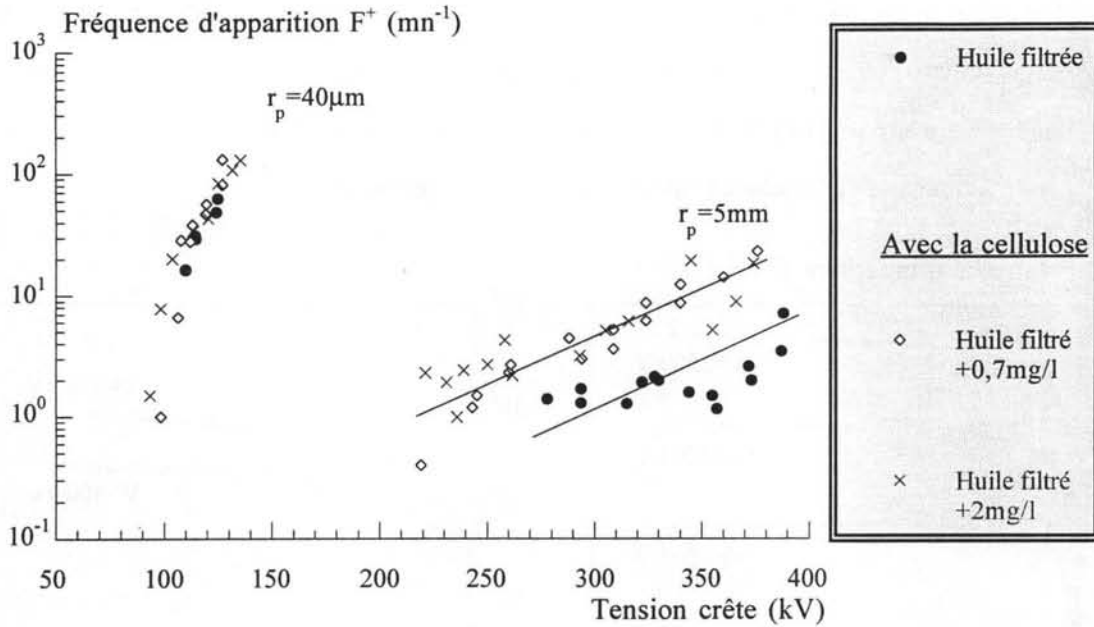


Figure 3.19: Fréquence d'apparition des streamers positifs en fonction de la teneur en particules de cellulose ($\varphi=26\text{ppm}$; $d=40\text{cm}$).

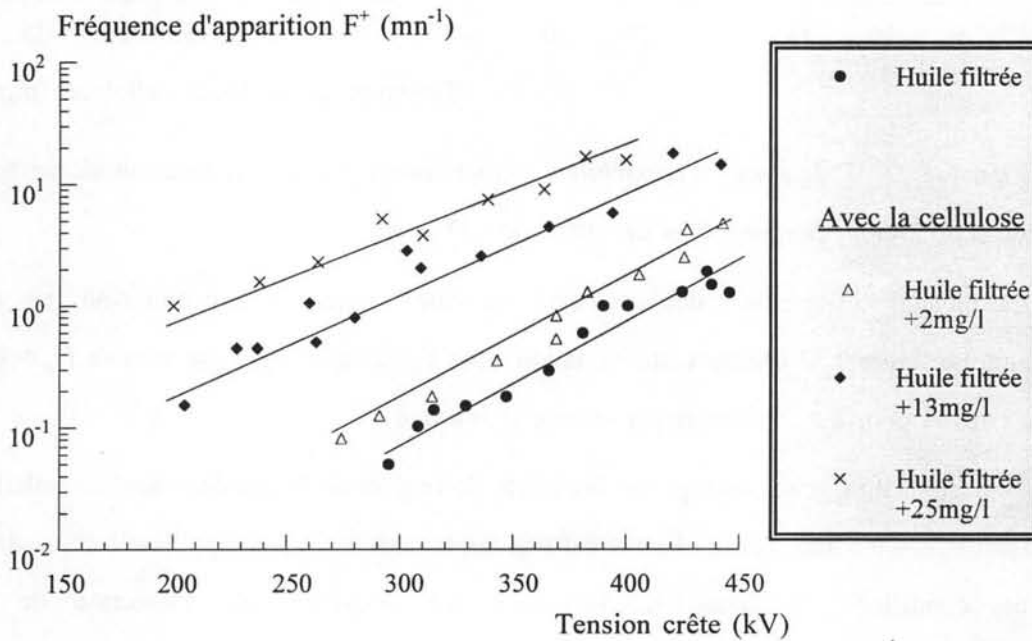


Figure 3.20: Fréquence d'apparition des streamers positifs en fonction de la teneur en particules de cellulose ($\varphi=35\text{ppm}$; $r_p=10\text{mm}$; $d=40\text{cm}$).

L'influence des particules de cellulose sur la génération des streamers positifs et négatifs est observée dans tous les essais pour des rayons de courbure de $10\ \mu\text{m}$ à $10\ \text{mm}$. L'effet est faible pour les pointes ($r_p = 10\ \mu\text{m}$ et $40\ \mu\text{m}$) et nettement plus marqué pour les tiges ($r_p = 0,5\ \text{mm}$ et $r_p = 8\ \text{mm}$). Dans ce cas, l'addition d'une faible quantité de fibres de cellulose ($0,7\ \text{mg/l}$) à de l'huile filtrée augmente notablement la fréquence d'apparition.

Cet effet n'est pas proportionnel à la teneur en particules : l'addition d'une quantité importante de particules de cellulose (d'une teneur supérieure à 2 mg/l) ne provoque qu'un accroissement modéré de $F(V)$. Sur la figure 3.21, nous présentons cette variation en fonction de la teneur en cellulose pour quelques valeurs de la tension appliquée.

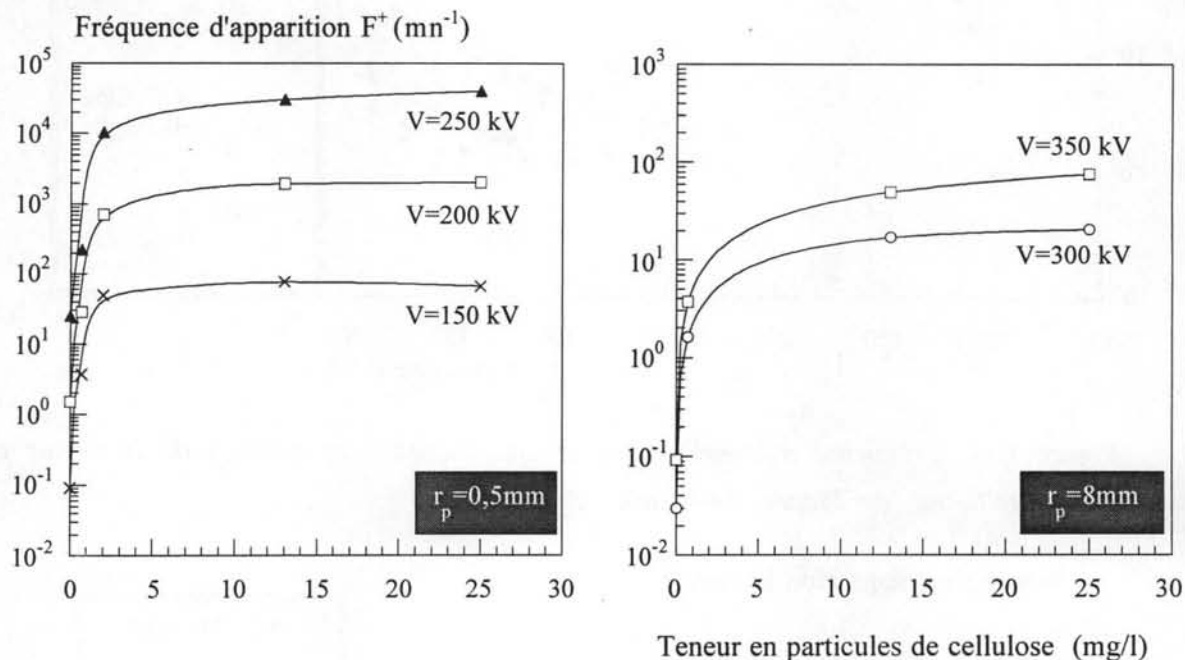


Figure 3.21: Fréquences d'apparitions des streamers positifs en fonction de la teneur en cellulose à différentes tensions fixes ($d=40\text{cm}$, $\varphi=17\text{ ppm}$).

La tension d'apparition des streamers diminue lorsque la concentration en cellulose augmente. La figure 3.22 illustre cette variation pour $F = 10$ streamers par minute ($r_p = 10\ \mu\text{m}$ et $r_p = 0,5\text{ mm}$) et pour $F = 1$ streamer par minute ($r_p = 8\text{ mm}$).

Pour $r_p = 8\text{ mm}$, nous voyons que les effets de l'eau et de la cellulose sont cumulatifs. Pour $r_p = 10\ \mu\text{m}$ et $r_p = 0,5\text{ mm}$, l'effet observé est très faible mais n'est pas significatif étant donné que dans ces conditions, le champ sur l'électrode est déterminé par l'injection de charges, particulièrement en présence d'eau.

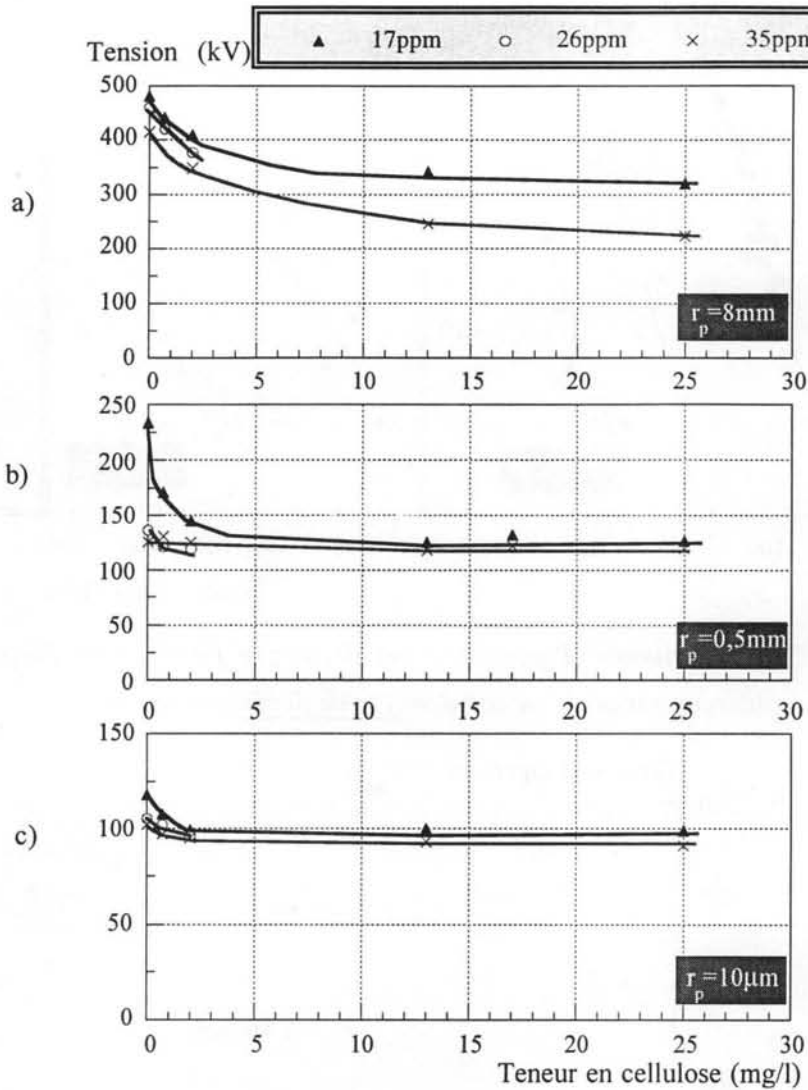


Figure 3.22: Tension d'apparition d'un nombre fixe de streamers en fonction de la teneur en cellulose et en eau ($d=40\text{cm}$, $F=10$ streamers par minute pour $r_p=10\ \mu\text{m}$ et $r_p=0,5\text{ mm}$ et $F=1$ streamer par minute pour $r_p=8\text{ mm}$)

3.2.2 INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU

3.2.2.1 Huile filtrée

L'effet de l'addition d'eau dans l'huile filtrée est présenté sur la figure 3.23 avec différents rayons de courbure de l'électrode.

Lorsque la teneur en eau augmente, un effet inverse (la fréquence d'apparition des streamers décroît) et la diminution de la proportion des streamers négatifs ont été observés. Nous constatons que l'influence de l'eau est plus nette pour des petits rayons de courbure de l'électrode (figure 3.24). Cet effet est dû à l'injection de charge qui est renforcée en présence d'eau et dont l'effet est plus sensible avec des champs fortement divergents.

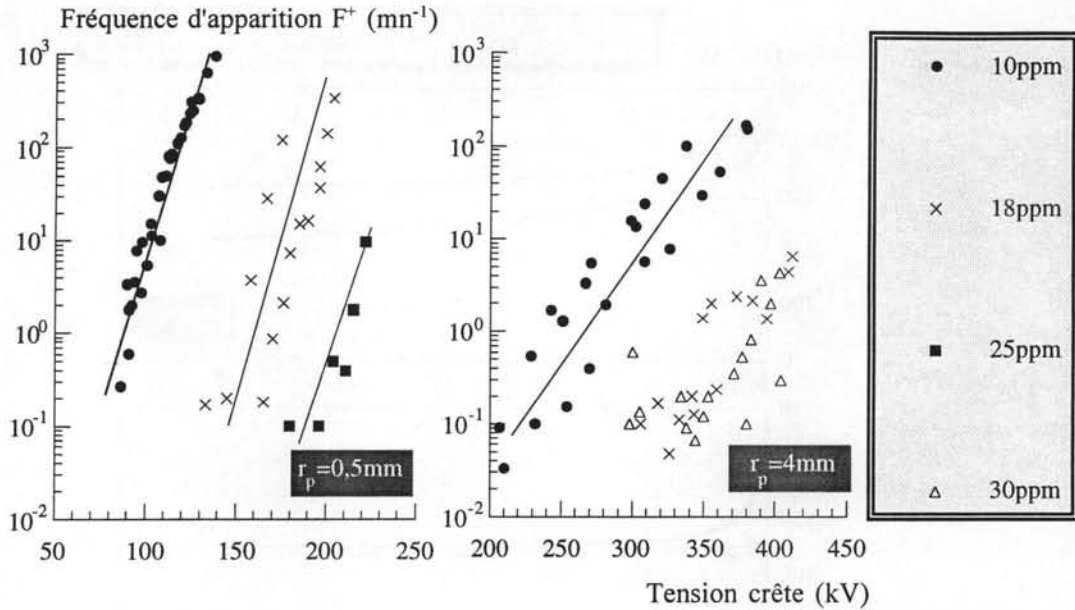


Figure 3.23: Fréquence d'apparition des décharges positives en fonction de la tension appliquée avec différentes teneurs en eau dans l'huile filtrée ($d = 40\text{ cm}$).

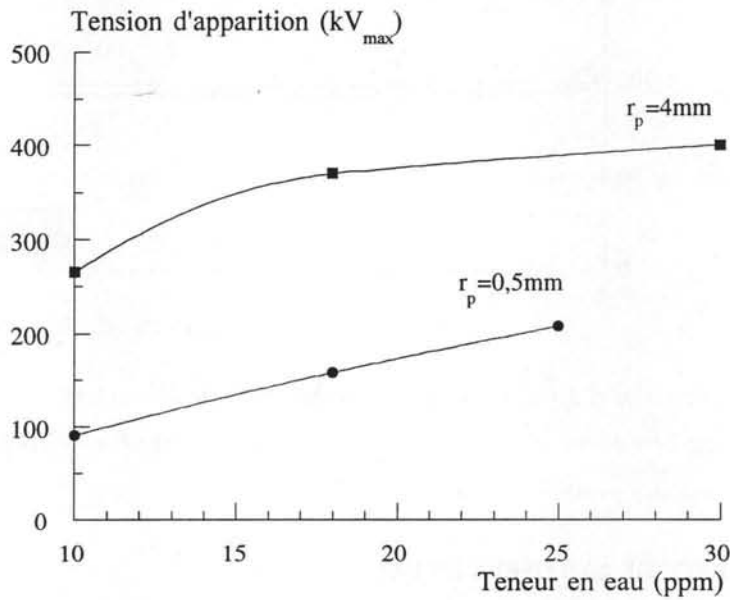


Figure 3.24: Tension d'apparition des streamers positifs ($F = 1\text{ mn}^{-1}$) en fonction de la teneur en eau dans l'huile filtrée ($d = 40\text{ cm}$).

3.2.2.2 En présence des particules de cellulose

Des essais similaires ont été réalisés ensuite dans l'huile contenant une teneur importante de cellulose (17 mg/l) pour différentes teneurs en eau (figure 3.25).

Un effet similaire à celui observé dans l'huile filtrée existe : la fréquence d'apparition $F(V)$ diminue avec la teneur en eau. Cependant, dans l'huile contenant des particules de cellulose, la diminution de la fréquence d'apparition est beaucoup moins marquée que dans l'huile filtrée. Dans

ces expériences, il est à noter que la disparition totale des décharges négatives a été observée pour l'addition d'une quantité importante d'eau.

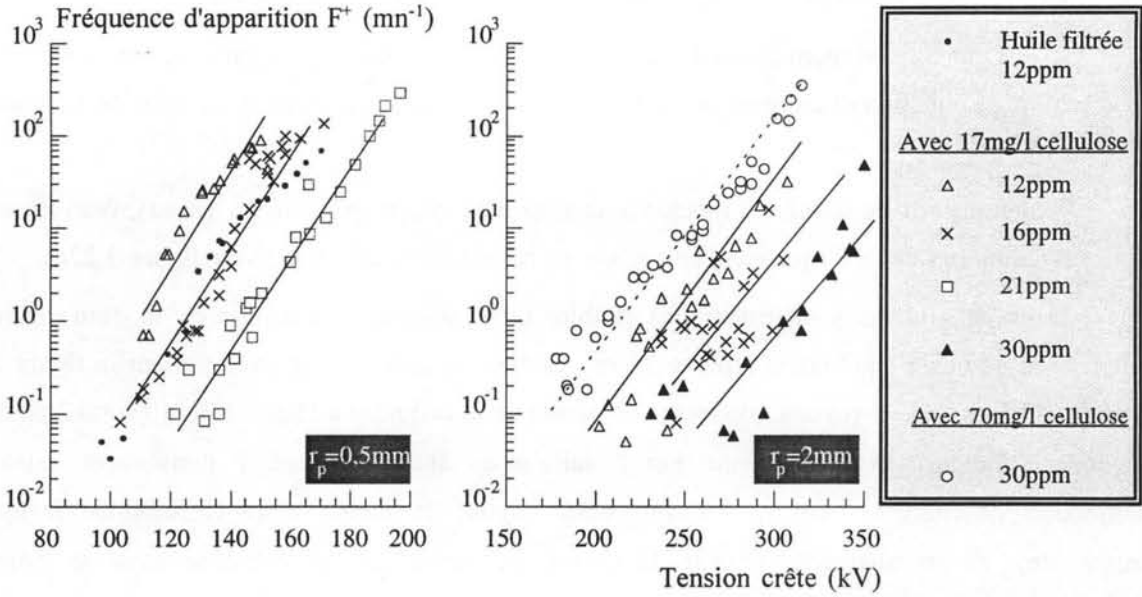


Figure 3.25: Fréquence d'apparition de décharges positives avec différentes teneurs en eau. Huile contenant 17 mg/l de cellulose ($d=40\text{cm}$).

Sur la figure 3.25, nous avons rapporté également les fréquences d'apparition mesurées dans l'huile filtrée ($r_p=0,5 \text{ mm}$, $\phi = 12 \text{ ppm}$) et puis dans l'huile fortement polluée (jusqu'à 70 mg/l de cellulose) à la fin des essais ($\phi=30 \text{ ppm}$).

Nous avons rapporté la variation de la tension d'apparition pour $F = 10 \text{ str./mn}$ en fonction de la teneur en eau sur la figure 3.26 pour l'huile contaminée avec une teneur fixe de fibres de cellulose (17 mg/l).

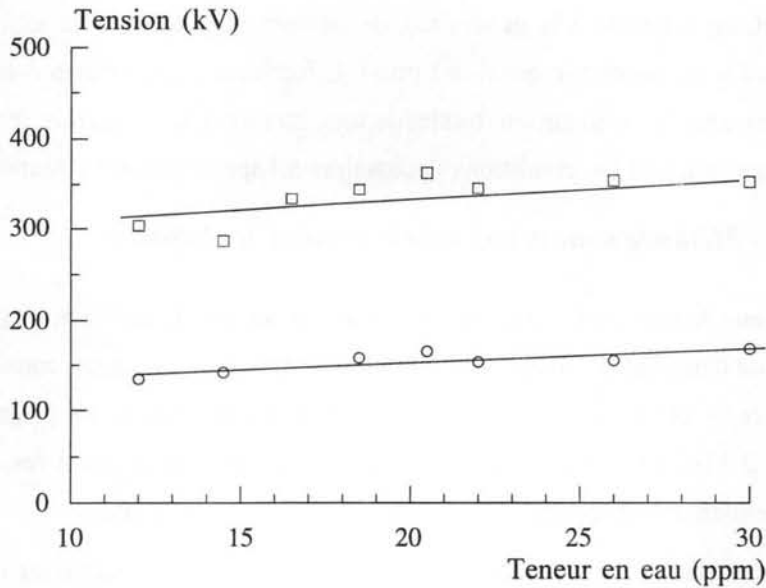


Figure 3.26: Tension d'apparition d'un nombre de décharges positives ($F = 10 \text{ streamers}$ par minute) en fonction de la teneur en eau ($d=40\text{cm}$, teneur en particules de cellulose 17mg/l).

3.2.2.3 Commentaires

Ces résultats montrent que l'addition d'eau a deux effets contradictoires :

- sous champ divergent (avec de faibles rayons de la pointe) dans l'huile filtrée (figure 3.24), elle renforce l'injection et entraîne une diminution du champ sur l'électrode et donc de la fréquence d'apparition;

- en présence de cellulose, lorsque le champ n'est pas trop élevé (r_p grand), l'eau provoque une augmentation de la fréquence d'apparition en hydratant la cellulose (voir figure 3.22a).

Dans les situations intermédiaires (faibles r_p en présence de cellulose), le comportement observé résulte d'un équilibre complexe entre ces deux tendances. Par exemple sur la figure 3.25, avec $r_p = 0,5$ mm, nous voyons que lorsqu'on ajoute de la cellulose à l'huile filtrée ($\varphi = 12$ ppm), la fréquence d'apparition F augmente. Par la suite si on ajoute de l'eau, F diminue en raison de l'injection de charges. Pour $r_p = 2$ mm, nous voyons le même effet (F diminue lorsque φ augmente). Si on augmente ensuite la teneur en particules de cellulose avec φ constant ($\varphi = 30$ ppm), F remonte sensiblement.

Notre but étant de comprendre l'influence de la pollution dans des situations proches de la réalité (grands volumes et champs faibles), l'étude de la génération avec des électrodes de r_p faible n'est donc pas adaptée. Avec des rayons de courbure plus grands ($r_p > 10$ mm), le comptage des streamers n'est plus possible car le claquage survient en général dès les premières décharges générées. Nous avons donc procédé à une étude du claquage avec ce type d'électrodes en présence diverses pollutions.

3.2.3 INFLUENCE DE LA POLLUTION SUR LE CLAQUAGE

Des informations relatives à la génération des streamers peuvent être extraites des mesures de claquage effectuées en géométrie quasi-uniforme. Effectivement, le champ dans ces expériences est suffisant pour assurer la propagation totale de tout streamer qui apparaît. Par conséquent, les tensions de claquage reflètent les conditions nécessaires à l'apparition des streamers.

3.2.3.1 Méthode pour déterminer la tension de claquage

Pour déterminer la tension de claquage, nous avons adopté la méthode établie par la norme relative aux essais de claquage des liquides [CEI156]. La procédure retenue consiste à appliquer la tension de fréquence 50 Hz dont l'amplitude varie de zéro à la tension de claquage avec une vitesse d'augmentation de $2 \pm 0,2$ kV/s. Un temps d'attente d'au moins 2 minutes est respecté après chaque claquage afin de permettre la disparition des bulles générées lors du claquage.

Toutes les mesures ont été effectuées dans une configuration d'électrodes constituée de deux électrodes formées par une tige arrondie à l'extrémité hémisphérique (rayon de courbure 10 mm) en face d'une électrode de 50 mm avec le bord arrondi. Le système d'électrodes est placé dans la

grande cellule (volume de 150 litres). Avec une distance inter-électrodes de 2,5 mm, comme dans l'essai CEI 156, le champ est pratiquement uniforme. Par ailleurs, tous les essais ont été effectués en présence du brassage de l'huile à l'aide des deux hélices.

La tension de claquage est déterminée comme étant la valeur moyenne de 6 claquages réalisés sur le même remplissage.

3.2.3.2 Claquage dans l'huile filtrée

Dans l'huile filtrée, les mesures de la tension de claquage ont été réalisées avec différentes distances inter-électrodes en ajoutant progressivement de l'eau. Les résultats de ces essais ont été rapportés sur la figure 3.27. Les tensions de claquage sont exprimées en valeurs crêtes afin de les comparer avec les tensions de génération obtenues dans les mesures précédentes.

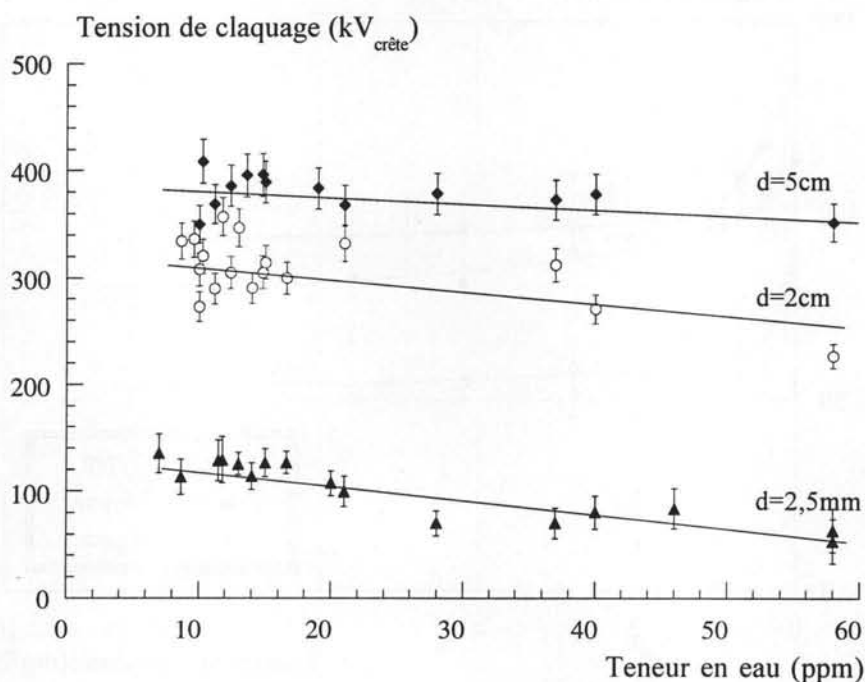


Figure 3.27: Influence de la teneur en eau sur la tension de claquage dans l'huile filtrée pour différentes distances inter-électrodes d .

Avec une faible distance inter-électrodes $d = 2,5\text{ mm}$, la tension de claquage diminue sensiblement lorsque la teneur en eau augmente, ce qui est généralement rapporté dans ce type de mesures. Elle décroît de 130 kV dans une huile déshydratée (teneur en eau de 7 ppm) à 70 kV pour une teneur en eau de environ 40 ppm, comme l'illustre la figure 3.27.

Pour des distances de 2 cm et 5 cm, la rigidité est moins affectée par la teneur en eau (l'effet est pratiquement nul à $d=5\text{ cm}$).

3.2.3.3 Influence des particules de cellulose

Nous avons ajouté des quantités croissantes de fibres de cellulose dans de l'huile filtrée. Les tensions de claquage pour différentes teneurs en eau pour une distance inter-électrode de 2,5 mm sont rapportées sur la figure 3.28.

Dans tous les cas, nous constatons que la tension de claquage diminue quand la concentration en cellulose augmente. L'effet est très sensible avec des petites quantités de particules (moins de 0,5 mg de cellulose par litre) et se sature en suite : la tension de claquage varie beaucoup entre 0 et 2 mg/l et faiblement au-delà. On voit également la diminution de la tension de claquage lorsque la teneur en eau augmente.

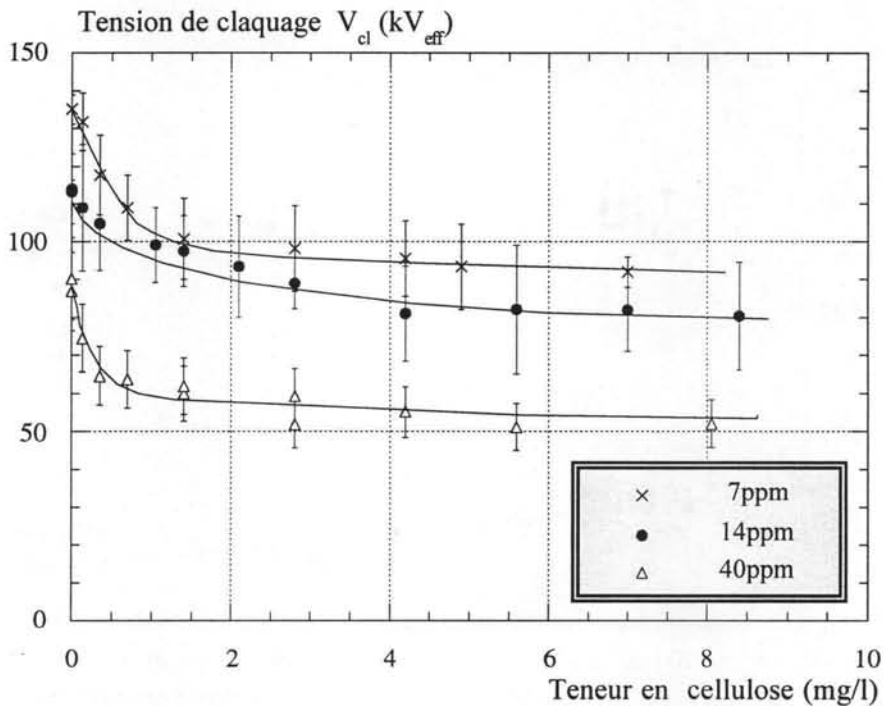


Figure 3.28: Influence des particules de cellulose sur la tension de claquage dans l'huile filtrée avec différentes teneurs en eau ($d=2,5\text{mm}$).

Sur la figure 3.29, nous rapportons les mesures de la tension de claquage à différentes distances dans une huile fortement polluée par des particules de cellulose (17 mg/l) en fonction de la teneur en eau.

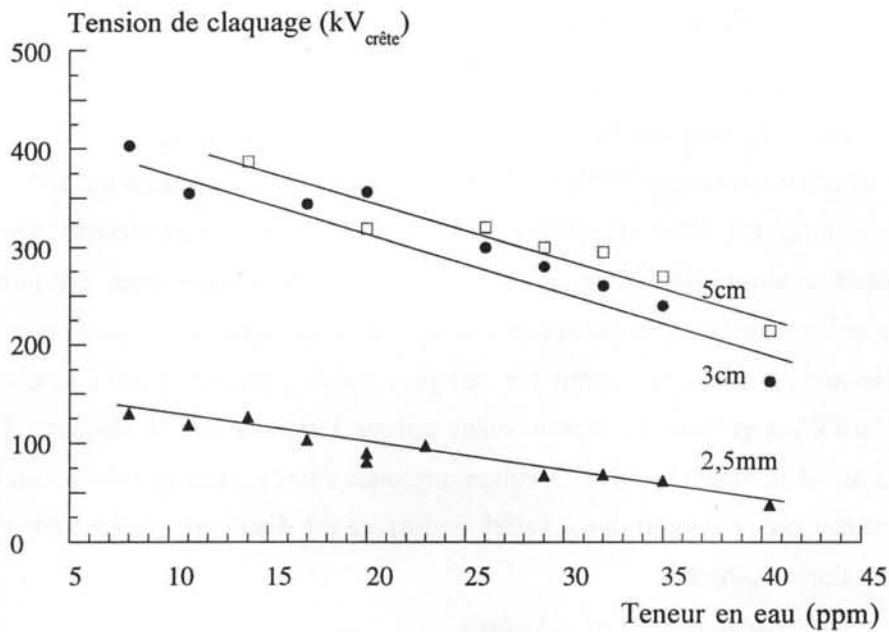


Figure 3.29: Tension de claquage en fonction de la teneur en eau. Huile avec 17 mg/l de cellulose.

3.3.3.4 Commentaires

Nous avons calculé le champ E_c sur l'électrode lors du claquage par le logiciel CSP [LEVI93] à partir des résultats de la tension de claquage pour différentes distances inter-électrodes d . Les résultats de ces calculs sont présentés sur les figures 3.30.

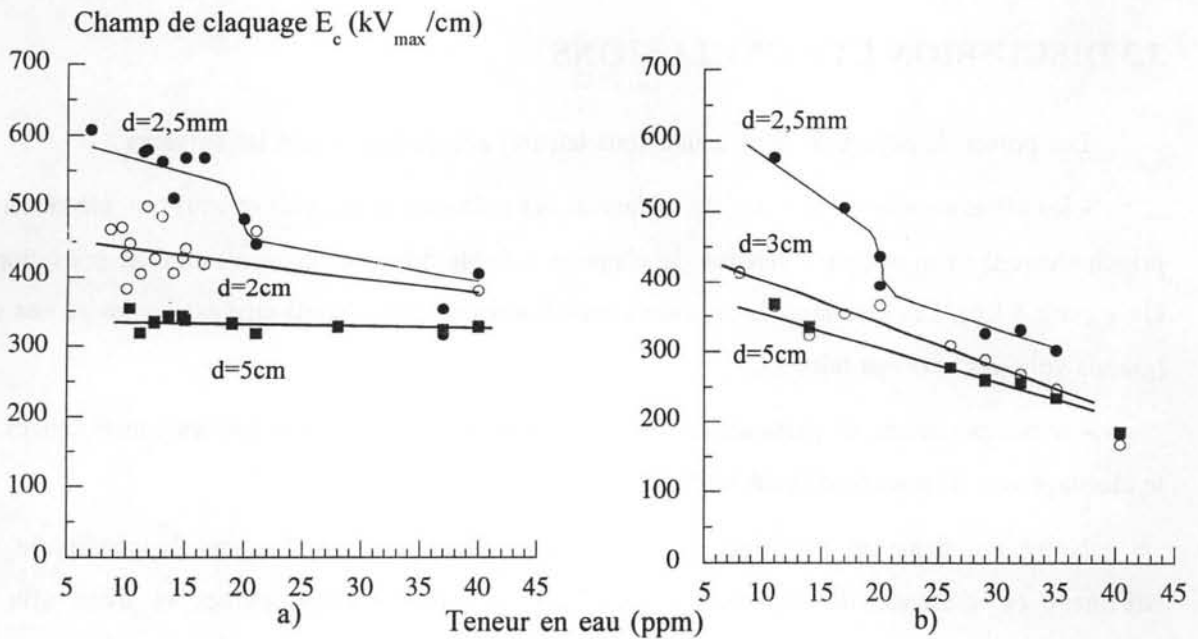


Figure 3.30: Champ de claquage en fonction de la teneur en eau a) dans l'huile filtrée et b) avec une teneur en cellulose de 17 mg/l.

a) Influence de l'eau

Dans l'huile filtrée, nous constatons que l'eau a une influence sur la tension de claquage si le champ de claquage E_c dans l'huile sèche et filtrée a une valeur élevée. A $d = 2,5$ mm, la surface d'électrode soumise à au moins 90% du champ maximum calculé par CSP est faible ($0,9$ cm²), et le champ de claquage est élevé ($E_c \approx 600$ kV/cm). L'addition de l'eau provoque une diminution du champ jusqu'à environ 400 kV/cm pour $\varphi = 40$ ppm. La décroissance est plus marquée vers 20 ppm, ce qui correspond à la saturation à température ambiante. A $d = 5$ cm avec $r_p = 10$ mm, la surface d'électrode soumise au champ fort est plus grande (environ 5 cm²), le champ de claquage vaut $E_c \approx 330$ kV/cm et l'eau n'a pratiquement aucune influence sur le claquage. Cette valeur est inférieure à la valeur mesurée à $d = 2,5$ mm en présence d'une grande quantité d'eau (400 kV/cm). Il semble donc que la dégradation due à l'effet de surface est dominante à $d = 5$ cm et que le rôle de l'eau devient alors négligeable.

b) Influence de la cellulose

En présence d'une quantité importante de cellulose (17 mg/l), le champ de claquage dans l'huile sèche n'est pratiquement pas modifié pour les trois distances. On conclut donc la cellulose sèche a peu d'influence sur le claquage. Quand on ajoute de l'eau, E_c diminue pour les trois distances. La diminution est nettement plus marquée pour $d = 2,5$ mm et E_c diminue jusqu'à 300 kV/cm (figure 3.30b). Cette valeur est inférieure à celle mesurée à $d = 5$ cm dans l'huile sèche. Par conséquent à $d = 5$ cm la dégradation de E_c due à la cellulose humide n'est plus négligeable devant celle due uniquement à l'effet de surface, et E_c diminue sensiblement lorsque la cellulose devient plus humide.

3.3 DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Les points de départ de notre étude sous tension alternative étaient les suivants :

- les effets connus de volume, de surface et des polluants (particules et eau) ont été observés principalement en mesurant la tension de claquage à faible distance (quelques mm) et sous champ élevé (voir § 1.6). Les résultats obtenus dans ces mesures ne peuvent pas être extrapolés au cas réel (grands volumes, champs faibles);
- le comportement de particules métalliques de grandes tailles ainsi que les conséquences sur le claquage ont été bien étudiés [RAIN91].

Notre but dans ces expériences sous tension alternative est d'étudier la génération des streamers en présence de nombreuses particules de tailles microscopiques et d'eau afin de comprendre leur effet sur le claquage. En raison de la décantation, il n'a pas été possible d'effectuer des expériences bien contrôlées avec des particules métalliques. Nous avons étudié

systématiquement la fréquence d'apparition des streamers en champ divergent alternatif. Les résultats obtenus se résument de la manière suivante :

- la fréquence d'apparition des streamers (F^+ et F^-) dépend du champ sur l'électrode;
- F augmente quasiment exponentiellement avec le champ;
- la génération des streamers est caractérisée par un champ d'apparition qui décroît avec le rayon de courbure de l'électrode r_p .

Cependant en champ divergent, les phénomènes d'injection de charges sous tension alternative modifient fortement le champ sur des pointes fines de manière difficilement prévisible. Par conséquent, le calcul du champ avec l'hypothèse d'absence de charges n'est pas valable et donne des valeurs très surestimées. A cause de cet effet, l'influence de l'eau est l'inverse de l'effet connu. Par contre, l'effet des particules métalliques ou isolantes, mis en évidence dans ces essais, est cohérent avec celui rapporté dans la littérature.

En conclusion, l'objectif initial de la thèse (étudier la génération des streamers sous tension alternative en géométrie divergente pour pouvoir visualiser et étudier le déclenchement des streamers par des particules microscopiques) est réalisable, mais l'extrapolation des effets observés au cas réel n'est pas correcte.

Avec des champs peu divergents, l'effet de l'injection est négligeable mais l'étude détaillée de la génération des streamers est impossible : le claquage intervient dès la première décharge. De plus, dans cette géométrie, la visualisation du comportement des particules microscopiques n'est pas possible. Nous n'avons donc pu mesurer que des tensions de claquage dans ces conditions.

Influence de la pollution

Les mesures de la tension de claquage avec $r_p = 10$ mm, dans des conditions proches de l'essai CEI ($d = 2,5$ mm), aboutissent à des conclusions cohérentes avec les observations antérieures : la teneur en eau et en particules de cellulose contribuent à une forte dégradation de la rigidité de l'huile (au maximum de 50%). Lorsque la surface soumise à un champ élevé augmente, deux effets s'ajoutent pour provoquer la diminution de E_c : un effet de surface, et l'influence des particules.

Effets de surface et de volume

Nos mesures montrent qu'il existe une dégradation importante du champ E_g qui n'est pas due aux particules (dans l'huile bien filtrée) quand le rayon de l'électrode (donc la surface et/ou le volume contraint du liquide) augmente.

La figure 3.31 montre que cet effet est observé dans l'huile très bien filtrée et en présence de forte pollution.

Un effet identique est observé sous impulsions de tension (voir chapitre suivant) dans lequel les particules n'ont pas d'influence et qui peut donc essentiellement être attribué à l'augmentation de la probabilité d'existence de défauts quand la surface augmente. Cette conclusion est cohérente avec celle de N. Giao Trinh et al. [TRIN82] obtenue sous champ uniforme selon laquelle l'effet de surface domine pour les liquides bien filtrés.

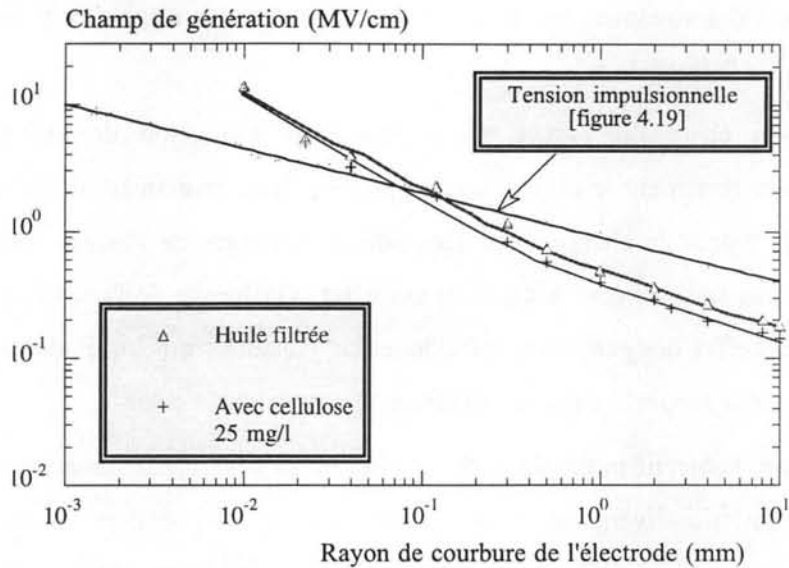


Figure 3.31: Champ de génération d'un nombre de décharges $F = 10 \text{ mn}^{-1}$ en fonction du rayon de courbure de l'électrode dans l'huile filtrée et avec 25 mg/l de cellulose ($\varphi = 17 \text{ ppm}$).

Nous présentons les courbes du champ de génération et de claquage dans l'huile filtrée en fonction de la surface des électrodes soumise au champ élevé (elle est approximativement calculée comme $2\pi r_p^2$) afin de comparer aisément ces résultats avec les effets d'échelle rapportés dans la littérature.

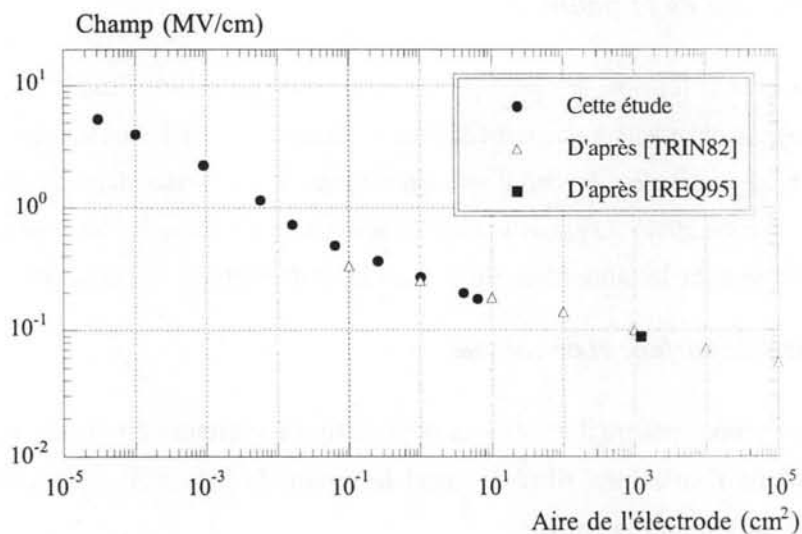


Figure 3.32: Variation du champ de génération et de claquage dans l'huile filtrée [TRIN82, IREQ95] en fonction de la surface de l'électrode.

La figure 3.32 montre que nos résultats sont cohérents avec les mesures sous champ uniforme de N. Giao Trinh et al. [TRIN82].

Sous tension alternative, la dégradation due aux particules se superpose à cet effet. Les mesures réalisées en ajoutant de la cellulose hydratée indiquent que la diminution relative du champ de claquage est moins marquée quand ce champ de claquage est plus faible (lorsque la surface augmente). Ces résultats montrent que dans les applications où le champ maximum est largement plus faible (≈ 50 kV/cm), il est probable qu'il n'y a pas d'influence de la cellulose et de l'eau.

Les mesures réalisées ne permettent pas d'obtenir une conclusion identique pour les particules métalliques.

CHAPITRE 4 : RESULTATS EXPERIMENTAUX

***GENERATION DES STREAMERS SOUS TENSION
IMPULSIONNELLE EN GEOMETRIE POINTE-PLAN
ET SEMI-UNIFORME***

Sommaire

4.1 GEOMETRIES POINTE-PLAN ET TIGE-PLAN.....	109
4.2 GEOMETRIE SEMI-UNIFORME.....	126
4.3 DISCUSSION SUR LA GENERATION DES STREAMERS SOUS CRENEAUX DE TENSION....	142
4.4 PROPAGATION DES STREAMERS EN GEOMETRIE SEMI-UNIFORME.....	148

CHAPITRE 4 : GENERATION DES STREAMERS SOUS TENSION IMPULSIONNELLE EN GEOMETRIE DIVERGENTE ET SEMI-UNIFORME

Ce chapitre a pour objet d'étudier la génération des streamers sous créneaux de tension, ce qui permet de caractériser l'apparition des décharges dans des conditions pour lesquelles les effets défavorables de l'injection de charges spatiales, des particules et de l'eau peuvent être évités. Dans ces conditions, il est possible de calculer le champ de génération avec des électrodes de différentes tailles. Nous présentons, en premier lieu, une étude en champ divergent (géométrie pointe-plan ou tige-plan) en faisant varier largement le rayon de courbure de l'électrode (de quelques μm à une dizaine de mm). Dans le but de passer progressivement de la géométrie pointe-plan à une configuration de champ uniforme plan-plan, nous réalisons ensuite une étude comparable en géométrie semi-uniforme avec une électrode d'amorçage de différentes dimensions. Cette étude permettra de simuler un défaut à la surface de l'électrode et de comprendre comment un streamer peut être déclenché dans cette situation.

4.1 GEOMETRIES POINTE-PLAN ET TIGE-PLAN

4.1.1 GENERALITES

Comme nous avons vu au chapitre précédent que la génération des streamers dépend fortement de la géométrie utilisée, dont le champ est déterminé principalement par le rayon de courbure de l'électrode pointue. Nous avons donc réalisé une étude en faisant varier essentiellement le rayon de l'électrode, et la distance inter-électrodes a été maintenue fixe (de quelques mm à quelques cm suivant les expérimentations).

4.1.1.1 Méthodes expérimentales

Dans certaines conditions, la tension d'apparition des streamers dépend du temps de montée des créneaux de tension, en particulier avec des pointes fines de rayon de courbure de quelques μm (voir § 1.4) [GOUR94a]. Pour mesurer correctement la tension d'apparition des streamers, l'usage de créneaux rectangulaires de tension de temps de montée très rapide est indispensable. Le front de montée raide permet de minimiser l'effet de l'injection de charges d'espace, les streamers apparaissent quand la tension est proche du maximum.

Dans nos expériences, deux formes différentes de créneaux de tension ont été utilisées :

- des impulsions d'amplitude maximale de $\pm 80\text{kV}$ avec un temps de montée d'environ 20 ns d'une durée constante de $5\text{ }\mu\text{s}$ pour les pointes de rayon $r_p < 200\text{ }\mu\text{m}$ (voir §2.5.1.1);
- des impulsions d'amplitude jusqu'à $\pm 500\text{kV}$ de forme de $400\text{ ns}/1400\text{ }\mu\text{s}$ (§2.5.1.2) pour les pointes de rayon $r_p > 200\text{ }\mu\text{m}$.

Selon les conditions expérimentales, le seuil de génération des streamers a été détecté différemment par des méthodes décrites précédemment au chapitre 2.

a) Méthode de détection par ombroscopie

La génération des streamers est déterminée par observation des images fournies par la caméra (voir §2.6).

Cette technique peut être utilisée dans les expériences utilisant une géométrie dans laquelle on connaît bien le lieu d'apparition des streamers (par exemple, à l'extrémité d'une pointe) afin de focaliser la visualisation. Un montage optique de haute résolution (de l'ordre de $1\text{ }\mu\text{m}$) permet de détecter les streamers dès leur génération.

Cependant, lors des essais avec des pointes de très faible rayon de courbure (environ $1\text{ }\mu\text{m}$), les streamers apparaissent à des tensions relativement basses (quelques kV). Les premiers streamers sont alors de taille très petite (quelques μm) et ne durent que quelques centaines de nanosecondes. La détection précise est alors difficile, même en mesurant simultanément le courant ou le photocourant. Par conséquent, les mesures sont assez imprécises dans ces conditions.

Nous avons utilisé cette méthode dans les expériences réalisées en géométrie divergente pointe-plan avec des pointes de rayon jusqu'à $200\text{ }\mu\text{m}$.

b) Détection par courant et photocourant associé

En champ moins divergent tige-plan, la méthode précédente peut être utilisée pour observer l'évolution des streamers mais n'est plus appropriée pour détecter leur seuil de génération. On ne connaît pas exactement l'endroit où un streamer peut apparaître, et le montage optique, focalisé sur la totalité de la surface de la tige, risque de ne pas détecter de petits streamers. Dans ces conditions, la méthode plus adaptée est la détection par les signaux de courant et de photocourant, décrite précédemment au chapitre 2 (voir §2.7). Dans notre étude, cette technique a été utilisée pour mesurer la tension d'apparition ainsi que le temps de retard des streamers en géométrie tige-plan pour les tiges de rayon $r_p \geq 200\text{ }\mu\text{m}$.

On note également que l'enregistrement du photocourant et la visualisation par ombroscopie ne peuvent pas être réalisés en même temps, car le système de visualisation se compose d'une source pulsée de lumière, qui empêche l'utilisation du photomultiplicateur.

4.1.1.2 Définition de la tension de génération

L'apparition des streamers dans les liquides diélectriques est caractérisée par une certaine dispersion. Pour une configuration fixe des électrodes (r_p et d), il existe une tension, au-dessous de laquelle aucun streamer n'est généré. Au-dessus de ce seuil, les streamers apparaissent avec une probabilité qui croît avec la tension appliquée.

Il est donc nécessaire d'utiliser une méthode statistique pour mesurer la tension de génération des streamers. Cette méthode consiste à mesurer la probabilité d'apparition en fonction de la tension. On augmente progressivement la tension par paliers à partir d'une tension correspondant à 0% de probabilité de génération jusqu'à la tension pour laquelle les streamers apparaissent à 100%. La probabilité d'apparition est obtenue en comptant le nombre des streamers générés pour une série de 25 essais à chaque niveau de tension.

La figure 4.1 illustre un exemple de la probabilité d'apparition des streamers en fonction de la tension appliquée pour un rayon de courbure r_p et à une distance inter-électrodes d fixe.

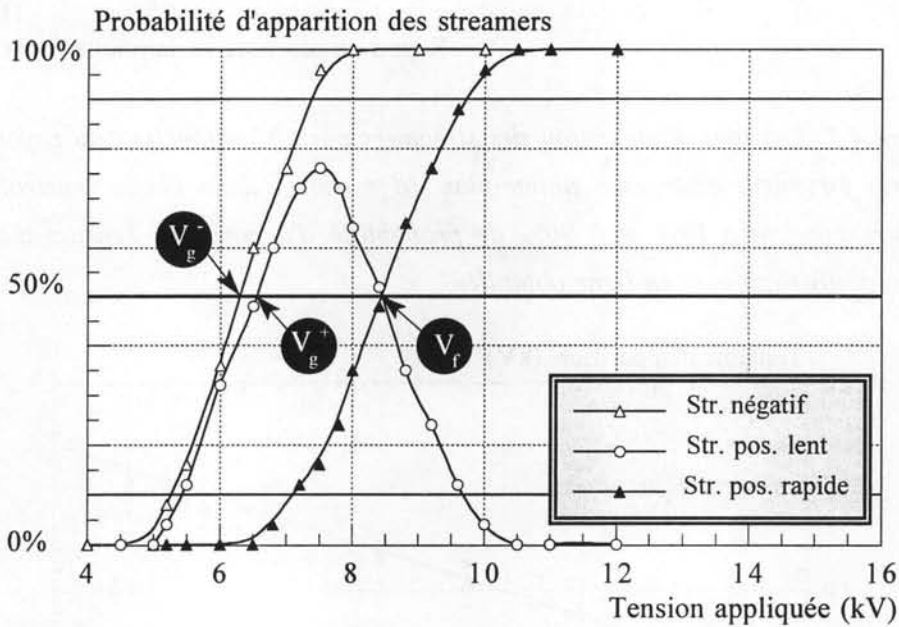


Figure 4.1: Exemple de mesure de la probabilité d'apparition des streamers dans l'huile de transformateur ($r_p = 1,7 \mu\text{m}$, $d = 6 \text{ mm}$) sous tension impulsionnelle.

Les tensions de génération des streamers négatifs V_g^- et celles des streamers positifs V_g^+ et V_f sont déterminées pour une probabilité d'apparition de 50%.

4.1.2 CHAMP FORTEMENT DIVERGENT POINTE-PLAN ($r_p < 10 \mu\text{m}$, $d = 6 \text{ mm}$)

Avec des pointes en tungstène de rayon $r_p < 10 \mu\text{m}$, nous avons constaté que les streamers sont générés toujours à l'extrémité de la pointe, juste après le temps de montée du créneau (le

temps de retard à l'apparition n'est pas mesurable). Les streamers observés dans l'huile minérale sont semblables à ceux décrits précédemment dans d'autres liquides (§1.3).

La tension d'apparition des streamers positifs en fonction du rayon de courbure de la pointe est présentée sur la figure 4.2 et celle des streamers négatifs sur la figure 4.3.

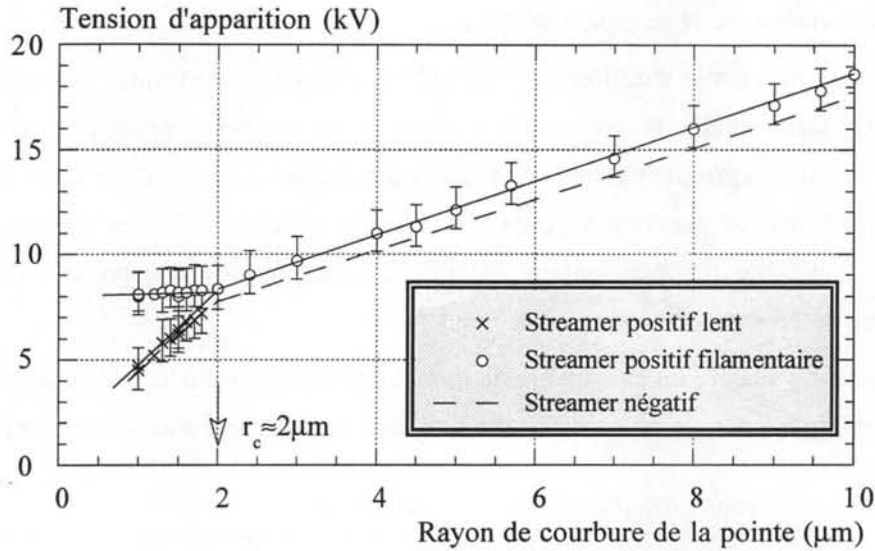


Figure 4.2: Tensions d'apparition des streamers positifs en fonction du rayon de la pointe en géométrie fortement divergente pointe-plan ($d = 6 \text{ mm}$) dans l'huile minérale. Les barres d'erreur correspondent à 10% et à 90% de probabilité d'apparition. Tension d'apparition des streamers négatifs rapportée en ligne pointillée.

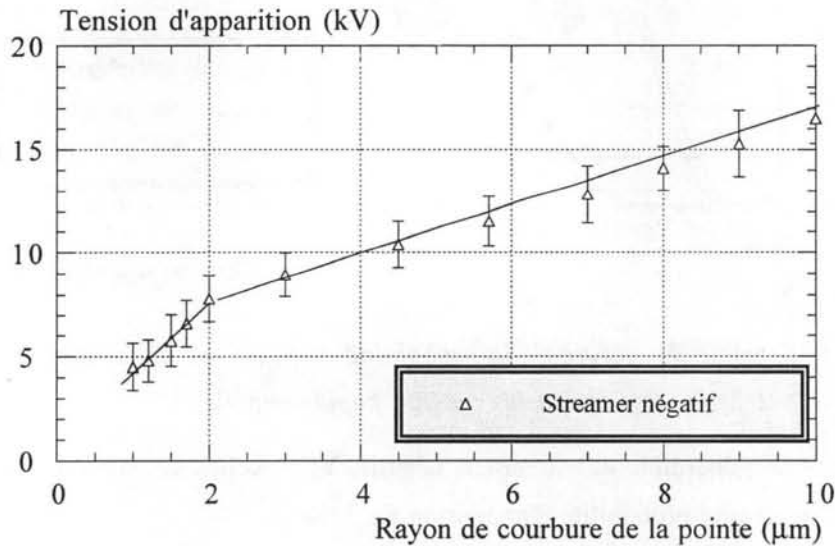


Figure 4.3: Tensions d'apparition des streamers négatifs en fonction du rayon de courbure de la pointe ($d = 6 \text{ mm}$). Les barres d'erreur correspondent à 10% et à 90% de probabilité d'apparition.

4.1.2.1 Polarité négative

Sur la figure 4.4, nous montrons quelques images des streamers négatifs générés sur la pointe de $r_p = 1,2 \mu\text{m}$ dans l'huile de transformateur.

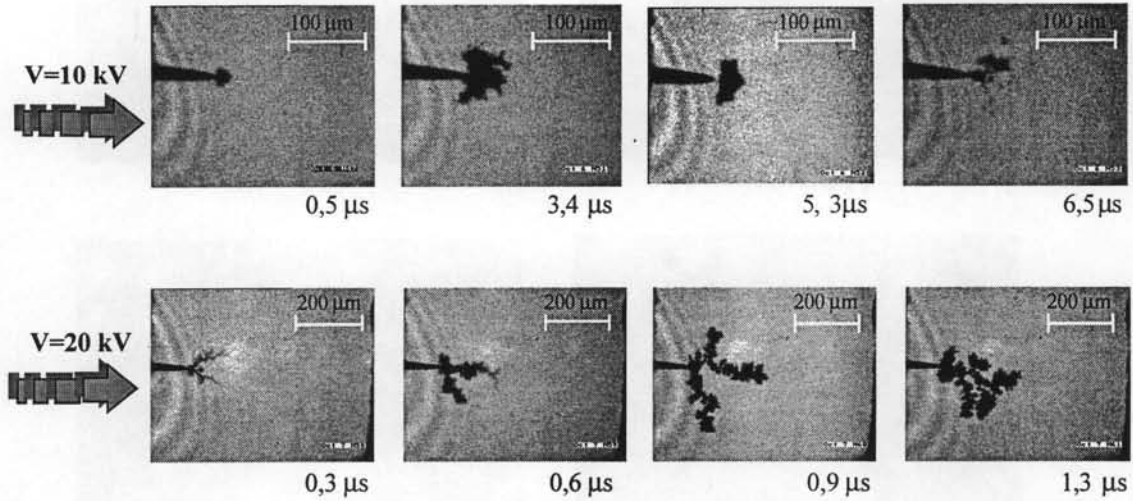


Figure 4.4: Apparition, propagation et disparition des streamers négatifs dans l'huile minérale pour deux tensions $V=10 \text{ kV}$ et 20 kV en géométrie pointe-plan ($r_p = 1,2 \mu\text{m}$, $d = 6 \text{ mm}$).

Pour des tensions proches de la tension de génération, les streamers négatifs présentent une allure massive (en buisson) aux contours arrondis. Leur contour devient irrégulier après quelques centaines de nanosecondes, avec la création de quelques branches si la durée de propagation est suffisamment longue. Après s'être propagés, les streamers s'arrêtent à une certaine distance de la pointe. Quelques microsecondes plus tard, ils se désagrègent pour former un nuage de bulles qui disparaissent rapidement dans le liquide.

Pour des tensions plus élevées, les streamers négatifs se déforment et se ramifient comme dans l'exemple de la figure 4.5. La forme ramifiée des streamers négatifs est caractérisée par un nombre moins important des filaments qui sont plus gros par rapport aux streamers positifs filamenteux (voir ci-dessous).

Nous constatons que les streamers négatifs ramifiés s'arrêtent à une distance de la pointe croissante avec la tension. A une certaine tension, ils parcourent tout l'espace entre les électrodes et touchent le plan bloquant (figure 4.5d). Dans les mêmes conditions, cela se produit en polarité positive à une tension plus basse (20 kV).

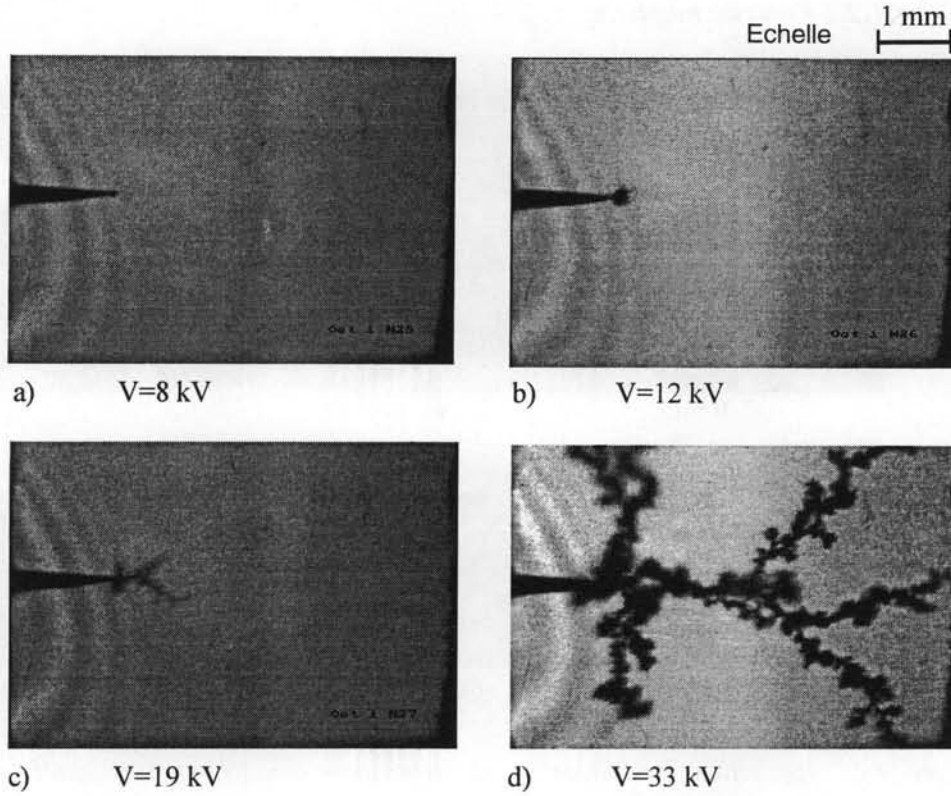


Figure 4.5: Streamer négatif dans l'huile de transformateur en géométrie pointe-plan ($r_p = 1,7 \mu\text{m}$, $d = 6 \text{ mm}$). Temps de retard a) $0,6 \mu\text{s}$; b) $0,8 \mu\text{s}$; c) $0,4 \mu\text{s}$ et d) $1,1 \mu\text{s}$.

Lors des mesures de la longueur (figure 4.6) et de la vitesse (figure 4.7) de propagation en fonction de la tension, il est clair qu'il s'agit d'un seul mode des streamers négatifs. La vitesse de propagation des streamers négatifs augmente régulièrement. Nous n'avons pas observé de changement soudain de la vitesse au passage de la forme touffue à la forme ramifiée comme en polarité positive (voir figure 4.7).

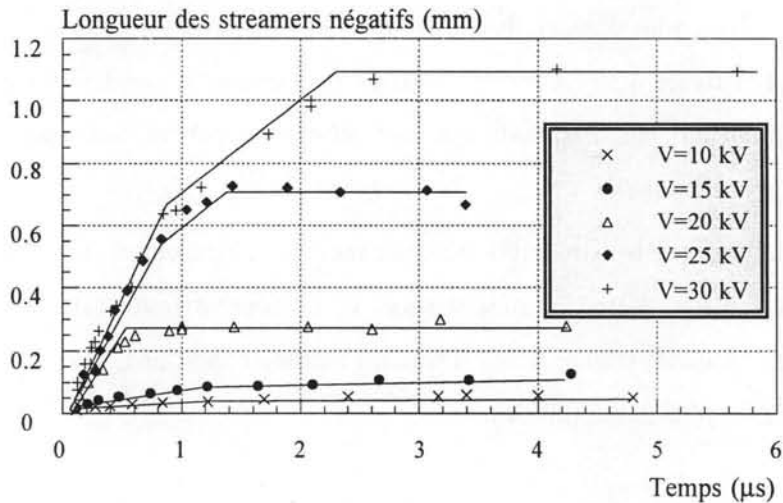


Figure 4.6: Longueur des streamers négatifs en fonction du temps dans l'huile minérale en géométrie pointe-plan ($r_p = 1,2 \mu\text{m}$, $d = 6 \text{ mm}$).

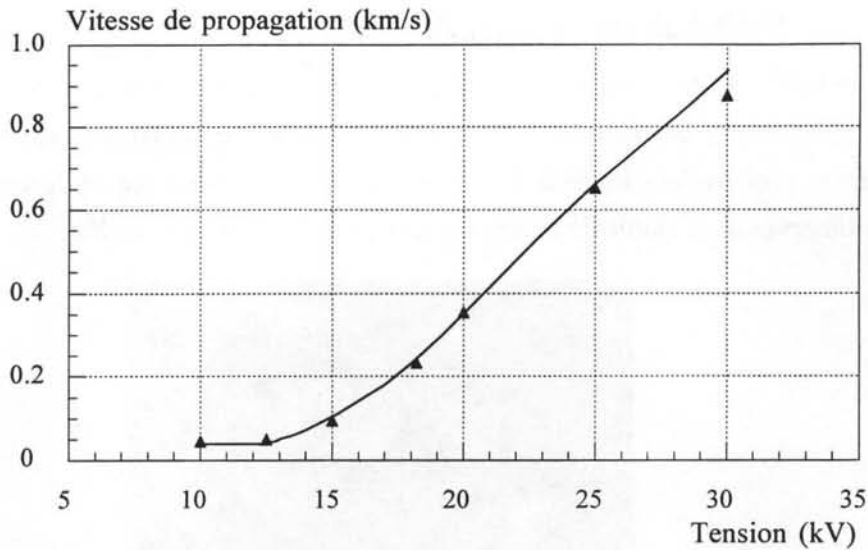


Figure 4.7: Vitesse de propagation des streamers négatifs en fonction de la tension en géométrie pointe-plan ($r_p = 1,2 \mu\text{m}$, $d = 6 \text{ mm}$)

Pour les tensions proches de la génération, les streamers négatifs se propagent à des vitesses de quelques centaines de m/s, qui sont du même ordre de grandeur que dans d'autres liquides. Lorsque la tension augmente, la vitesse de propagation croît, mais elle reste toujours subsonique, même pour des tensions proches de la tension de claquage pour lesquelles les streamers négatifs prennent la forme filamentaire.

4.1.2.2 Polarité positive

a) Mode de streamer positif lent

Ces streamers ont été observés uniquement pour des pointes très fines. Ils sont de forme massive (en buisson). L'aspect et le comportement des streamers lents sont analogues à celui des streamers négatifs décrits ci-dessus. D'une allure massive en buisson, ils se propagent très peu et se désagrègent en bulles avant leur disparition totale.

Dans nos expériences ($d = 6 \text{ mm}$ dans l'huile), ces streamers positifs lents ne sont observés que pour des pointes de rayon de courbure r_p inférieur à $2 \mu\text{m}$ (rayon critique r_c) et ne conduisent jamais au claquage. Lorsque la tension augmente, ce type de streamers est remplacé par des streamers filamenteux plus rapides qui sont responsables du claquage. C'est pourquoi les streamers lents n'ont pas été étudiés en détail.

On note également que la valeur $r_c \approx 2 \mu\text{m}$ dans l'huile est proche des limites expérimentales. D'une part, il est difficile de réaliser des pointes de si faible rayon de courbure et de les mesurer avec précision. D'autre part, les faibles tensions de génération (quelques kV) rendent les streamers difficiles à visualiser.

b) Mode de streamer positif rapide

En polarité positive, les streamers filamenteux se composent d'un nombre important de filaments (figure 4.8). Le nombre de filaments augmente avec la tension appliquée. Par rapport aux streamers générés dans les hydrocarbures tels que le cyclohexane et le pentane, ce type de streamers observés dans l'huile de transformateur est beaucoup plus ramifié.

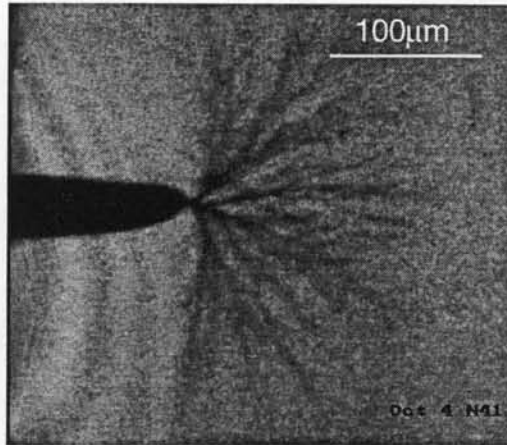


Figure 4.8: Streamer positif filamenteux en géométrie pointe-plan dans l'huile de transformateur ($r_p = 8 \mu\text{m}$, $d = 6\text{mm}$, $V = 16\text{kV}$, temps de retard $0,3 \mu\text{s}$).

Pour des pointes de $r_p < 2 \mu\text{m}$ et à une distance inter-électrodes $d = 6\text{mm}$, les streamers positifs filamenteux apparaissent pour des tensions supérieures au seuil de propagation $V_f \approx 8\text{kV}$, indépendant du rayon de courbure de la pointe (voir figure 4.2). Pour une tension inférieure à la tension de claquage, les streamers filamenteux s'arrêtent en atteignant une longueur maximale (longueur d'arrêt l_a). Sur la figure 4.9, la variation de la longueur des streamers en fonction du temps est présentée pour la pointe de $r_p = 2 \mu\text{m}$ et $d = 6\text{mm}$.

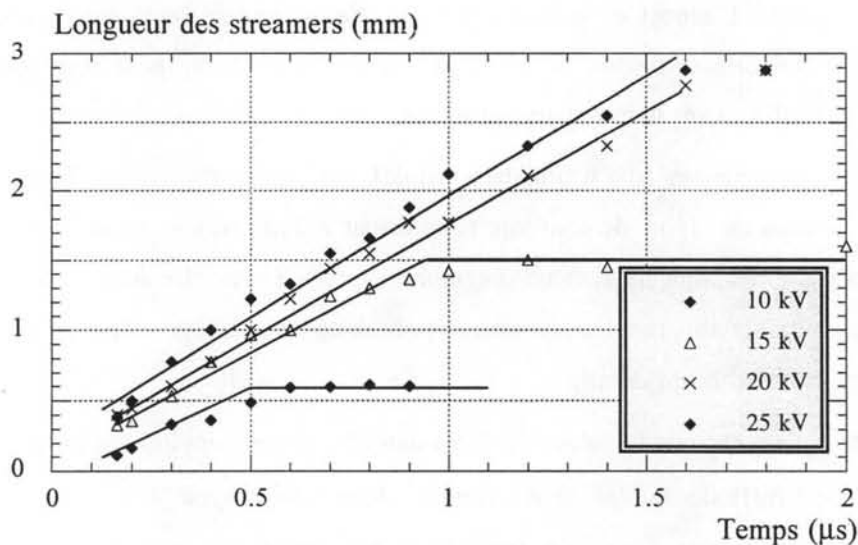


Figure 4.9: Longueur des streamers positifs filamenteux en fonction du temps ($d = 6\text{m}$).

La vitesse de propagation des streamers positifs filamenteux est montrée sur la figure 4.10.

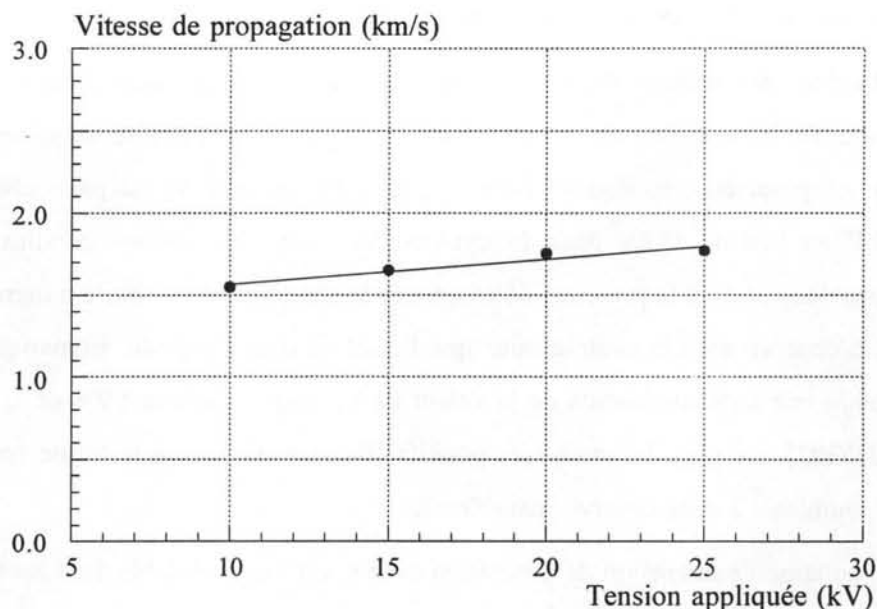


Figure 4.10: Vitesse de propagation des streamers positifs filamenteux dans l'huile de transformateur ($r_p = 2 \mu\text{m}$; $d = 6 \text{ mm}$).

La vitesse de propagation ne varie pratiquement pas avec la tension appliquée, comme cela a déjà été observé à plus grande distance [MASS97b].

On note que les deux modes distincts de streamers positifs ont été observés uniquement pour des pointes de rayon inférieur au "rayon critique" $r_c \approx 2 \mu\text{m}$, au-dessus duquel, seuls les streamers filamenteux apparaissent. L'existence d'un rayon critique r_c pour les streamers positifs est identique à celui observé par Gournay dans quelques hydrocarbures (§1.4). La particularité dans l'huile de transformateur est que r_c est sensiblement inférieur à ceux rapportés par Gournay dans le cyclohexane ($r_c \approx 6 \mu\text{m}$) et le pentane ($r_c \approx 3,4 \mu\text{m}$).

4.1.2.3 Commentaires

En polarité positive, au-dessous du rayon critique, les tensions d'apparition des deux types de streamers ne varient pas de la même manière : celle des streamers lents (V_g^+) croît régulièrement avec r_p tandis que la tension de génération des streamers filamenteux V_f reste constante (autour de 8 kV) jusqu'à r_c , correspondant à l'intersection des deux courbes. Au voisinage du rayon critique, nous observons les deux types de streamers positifs avec la même probabilité d'apparition.

L'influence du rayon de courbure sur la génération des streamers dans l'huile minérale est très proche de celle obtenue par Gournay dans des conditions similaires dans le cyclohexane et le pentane. Nous pouvons extraire donc les mêmes conclusions :

- i) - la génération des streamers positifs est caractérisée par un champ de génération qui dépend du rayon de courbure de la pointe;
- ii) - il existe une tension de seuil de propagation V_f des streamers filamenteux. Celle-ci traduit l'existence d'un champ minimum de propagation à la tête du streamer déterminé par les propriétés du liquide. Dans l'huile, cette tension V_f est particulièrement faible (8kV au lieu de 18kV dans le cyclohexane dans les mêmes conditions). Ceci est probablement dû à la présence de composés aromatiques dans l'huile minérale. En effet, il a été observé dans le cyclohexane que l'addition d'un composé aromatique (le pyrène) produit une forte diminution de la valeur de V_f , jusqu'à environ 50% de la valeur initiale [JUNG97]. De plus, les streamers positifs filamenteux ont une forme très ramifiée qui est semblable à celle observée dans l'huile.

L'augmentation de la tension de génération avec r_p est très semblable dans les deux polarités. Dans les mêmes conditions, la tension V_g^- d'apparition des streamers négatifs est toujours inférieure à celle des streamers positifs d'environ 5% comme indique la figure 4.2 sur laquelle la variation de la tension d'apparition des streamers négatifs est tracée en droite pointillée.

Nous verrons au §4.1.5.3 que l'augmentation de V_g avec r_p ne correspond pas à un champ de génération E_g^+ et E_g^- constant sur la pointe (E_g^+ et E_g^- diminuent quand r_p augmente).

4.1.3 GEOMETRIE POINTE-PLAN ($10\mu\text{m} < r_p < 200\mu\text{m}$, $d=6\text{mm}$)

4.1.3.1 Observations

Pour des pointes de rayon de courbure important, les streamers des deux polarités sont filamenteux, même pour les streamers négatifs. On ne peut plus observer la forme massive des streamers négatifs pour des pointes de rayon $r_p > 40\mu\text{m}$.

Quelques images de streamers des deux polarités sont présentées sur la figure 4.11. Nous avons observé qu'avec des pointes de faible rayon de courbure (jusqu'à quelques dizaines de micromètres), la génération des streamers a toujours lieu à l'extrémité de la pointe. Dans le cas des pointes de rayon plus important (une centaine de μm), l'endroit d'apparition des streamers peut être autre que le sommet de la pointe (figure 4.11b). Nous avons également enregistré quelques streamers générés simultanément à différents endroits sur la surface (figure 4.11c). Cela prouve l'existence de défauts (petites aspérités) sur la surface de ces pointes.

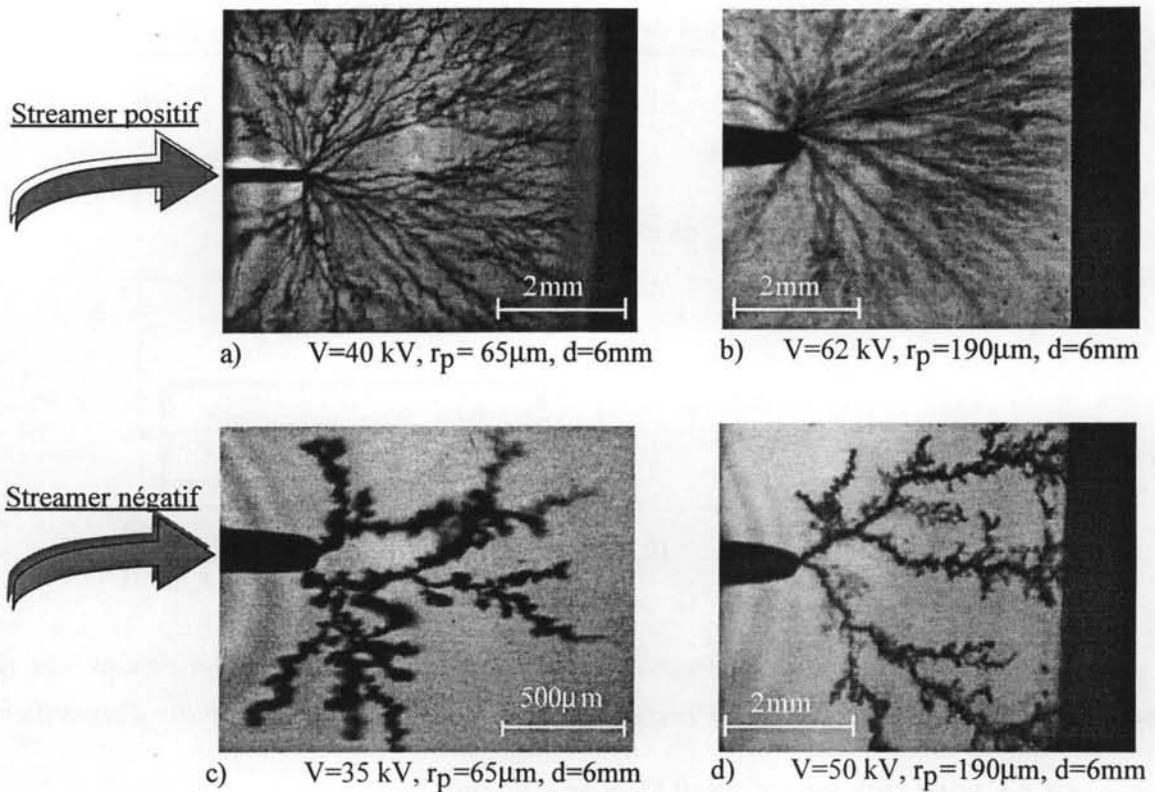


Figure 4.11: Streamers en géométrie pointe-plan dans l'huile de transformateur $d = 6 \text{ mm}$; $r_p = 65 \mu\text{m}$ et $r_p = 190 \mu\text{m}$.

Les streamers positifs sont constitués de multiples filaments très fins dont le nombre augmente selon la tension appliquée. Les streamers négatifs ramifiés, observés pour des tensions plus élevées ou pour des pointes de $r_p > 40 \mu\text{m}$, sont constitués de branches moins nombreuses et plus grosses (figure 4.11), ce qui est corrélé à leur vitesse de propagation moins élevée.

Notons également que lors des essais avec des pointes de grand rayon de courbure pour des tensions élevées, le streamer parcourt facilement la totalité de la distance entre la pointe et le plan bloquant. Il provoque ensuite souvent le claquage de l'isolation solide (feuille de polyéthylène de $0,8 \text{ mm}$) ce qui perturbe le système de mesures (oscilloscope, enregistrement des images). Par exemple, avec $r_p = 190 \mu\text{m}$ à une distance de 6 mm et pour des tensions de $60\text{-}70 \text{ kV}$, le claquage du solide isolant a lieu à chaque essai, même en remplaçant le plan bloquant.

4.1.3.2 Tensions d'apparition

La figure 4.12 illustre la variation des tensions d'apparition des streamers pour des pointes de rayon de $10 \mu\text{m}$ à $200 \mu\text{m}$.

Dans les deux polarités, les tensions d'apparition des streamers augmentent de manière identique avec le rayon de la pointe r_p . Les courbes $V(r_p)$ sont en continuité avec celles mesurées pour $r_p < 10 \mu\text{m}$.

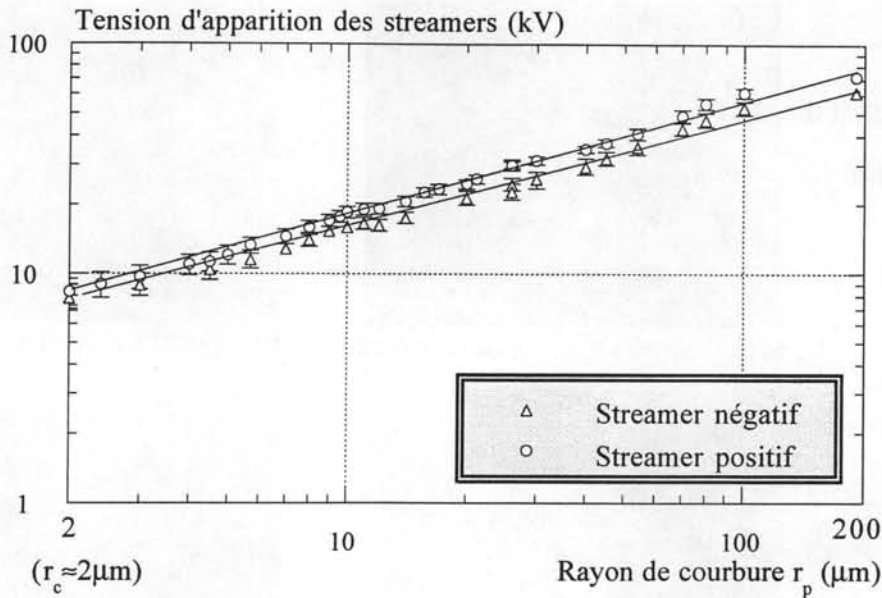


Figure 4.12: Tensions de génération des streamers en fonction du rayon de courbure de la pointe, $d=6\text{ mm}$. Les barres d'erreur correspondent à 10% et 90% de probabilité d'apparition.

4.1.4 GEOMETRIE TIGE-PLAN ($0,5\text{ mm} < r_p < 20\text{ mm}$)

Les mesures de la tension de génération en géométrie faiblement divergente tige-plan ont été réalisées avec le dispositif présenté sur la figure 2.8 et à deux distances $d=20\text{ mm}$ et $d=50\text{ mm}$.

4.1.4.1 Mesure du courant et du photocourant

La génération des streamers en géométrie tige-plan est déterminée par les mesures du courant et du photocourant dont un exemple d'enregistrement est présenté sur la figure 4.13.

On constate que l'apparition des streamers est observée au bout d'un temps t_i après l'application de la tension. Ce temps est plus ou moins long selon le rayon de courbure d'électrode et la tension appliquée. En champ fortement divergent ($r_p \leq 200\ \mu\text{m}$), les streamers apparaissent sans retard mesurable. Plus le champ est divergent et/ou plus la tension est élevée, moins le temps t_i est important. Pendant le temps de retard à la génération t_i , aucun signal (courant ou lumière émise) n'est détecté.

Après l'apparition, le streamer se propage pendant un certain temps t_p et peut conduire au claquage ou non selon la tension et la distance inter-électrodes. Dans l'exemple de la figure 4.13, le claquage intervient à la fin du temps t_c . Ce temps t_c est appelé temps de retard au claquage. En tension positive, le claquage intervient en géométrie pointe plan avec une probabilité de 50% pour une tension de 75 kV pour $d=20\text{ mm}$ et de 105 kV pour $d=50\text{ mm}$ [LESA98b, MASS98]. Dans la plupart de nos essais avec $r_p \geq 0,5\text{ mm}$, les tensions de génération étaient supérieures à ces valeurs et le claquage avait donc lieu pratiquement à chaque essai.

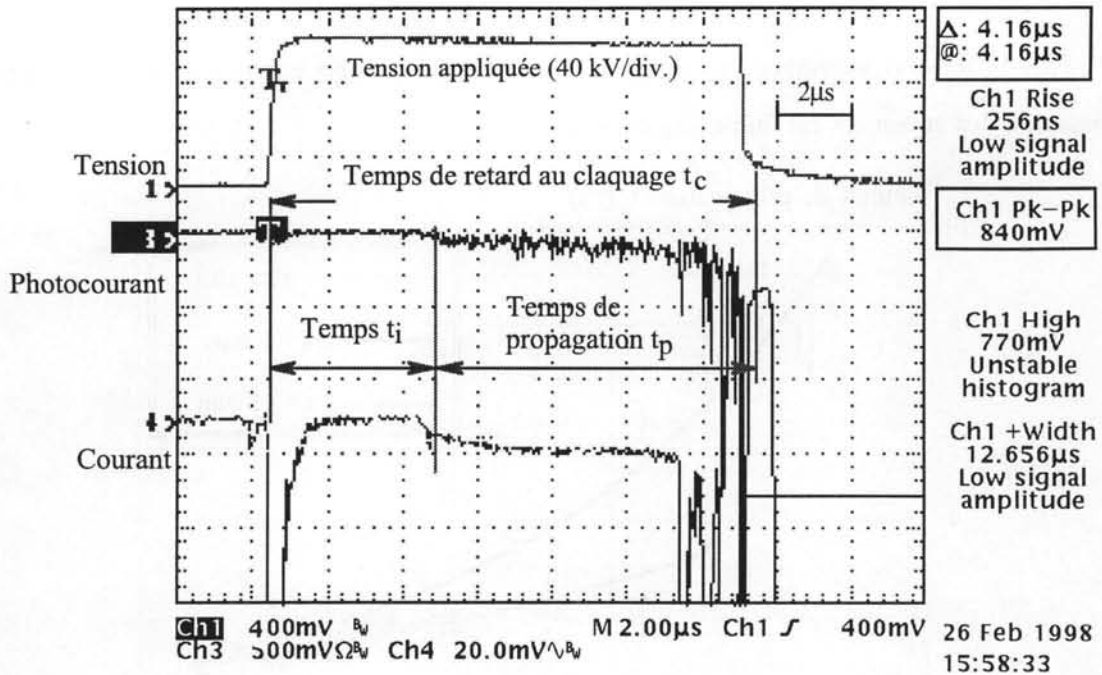


Figure 4.13: Exemple de l'enregistrement du courant et du photocourant associés à la génération et à la propagation d'un streamer positif : $r_p = 0,5 \text{ mm}$, $d = 20 \text{ mm}$, tension impulsionnelle $V = +84 \text{ kV}$.

4.1.4.2 Temps de retard à la génération

La figure 4.14 montre la variation du temps de retard à la génération t_i en fonction de la tension appliquée pour des tiges de $r_p = 0,5 \text{ mm}$ et $r_p = 2,5 \text{ mm}$. Ces paramètres ont été déterminés statistiquement sur une série de 10 essais pour chaque niveau de tension.

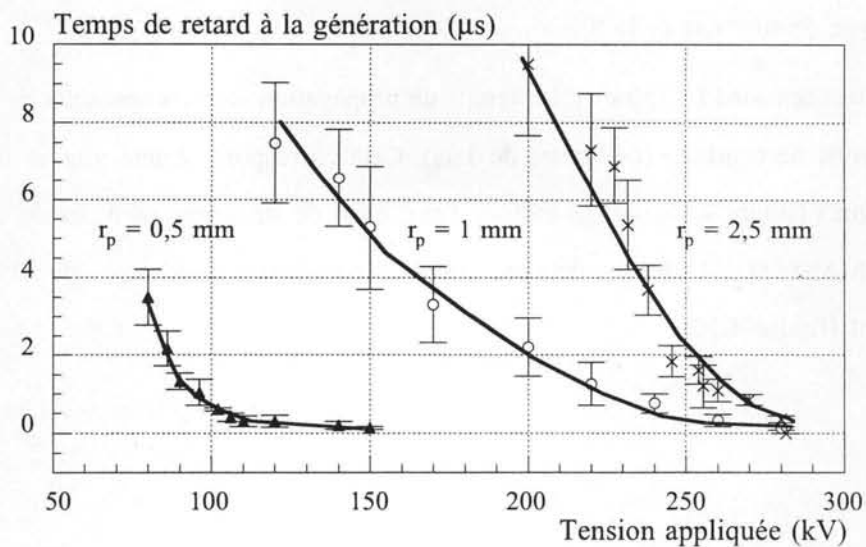


Figure 4.14: Temps de retard à la génération des streamers positifs sous tension impulsionnelle. Distance inter-électrodes $d = 20 \text{ mm}$.

4.1.4.3 Temps de propagation

Plus la tension appliquée est élevée ou le rayon de la tige est grand, plus le temps de propagation des streamers est faible (figure 4.15)

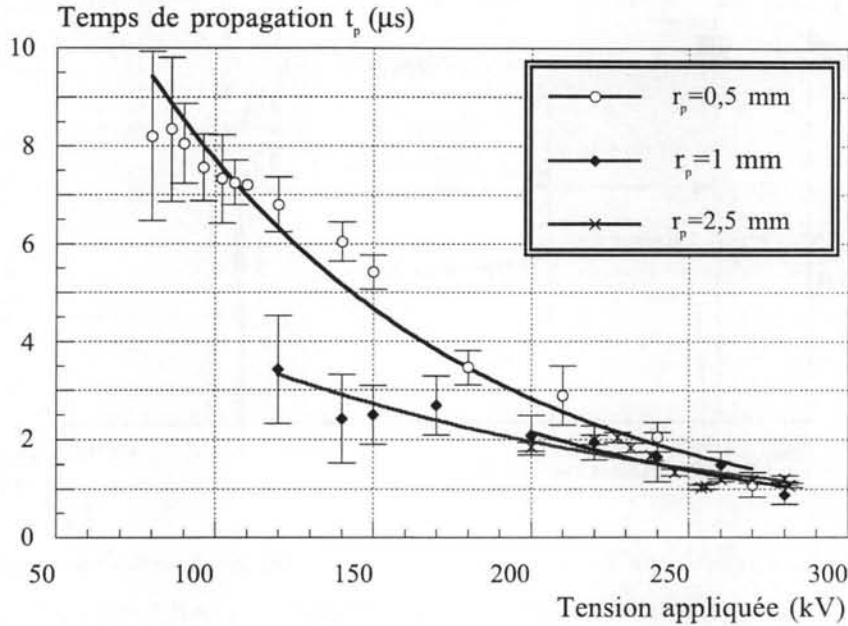


Figure 4.15: Temps de propagation des streamers positifs en géométrie tige-plan sous tension impulsionnelle. Distance inter-électrodes $d=20$ mm.

Comme nous l'avons mentionné, les tensions d'apparition des streamers pour des tiges de $r_p \geq 0,5$ mm sont supérieures à la tension minimale de claquage (75 kV à $d=20$ mm), et le claquage se produit à chaque essai. Pour des tensions proches de cette valeur, le temps de propagation dépend du rayon de courbure de la tige.

Aux fortes tensions (>250 kV), les temps de propagation sont comparables pour des tiges de différents rayons de courbure (de l'ordre de $1 \mu\text{s}$). Cela correspond à une vitesse de propagation d'environ 20 km/s (figure 4.16), ce qui indique l'existence de streamers du 3^e mode de propagation [LESA98b, MASS98]. A basse tension, nous retrouvons la vitesse de 2 km/s mesurée précédemment (figure 4.10).

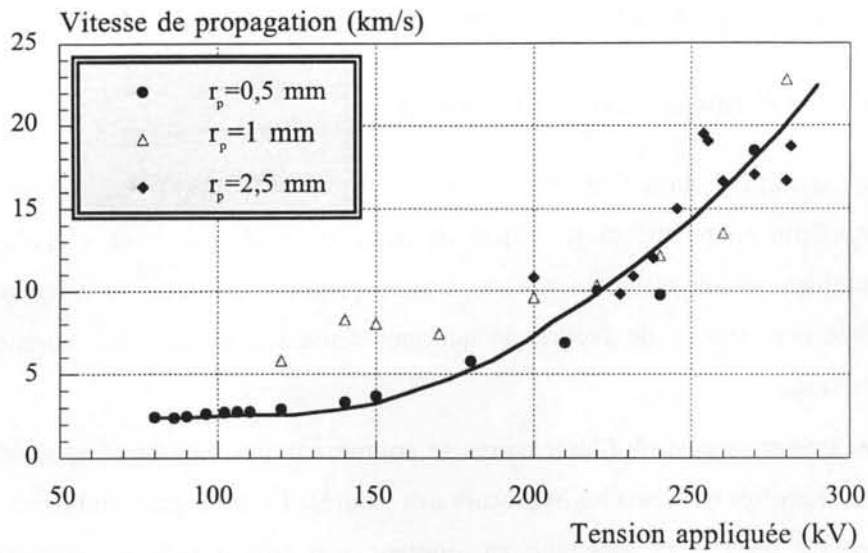


Figure 4.16: Vitesse moyenne de propagation des streamers positifs calculée à partir du temps de propagation de la figure 4.15 avec la distance inter-électrodes $d = 20$ mm.

4.1.4.4 Tension de génération des streamers

Les variations de la tension de génération des streamers en fonction du rayon de courbure de la tige pour deux distances inter-électrodes $d = 20$ mm et $d = 50$ mm sont rapportées sur la figure 4.17.

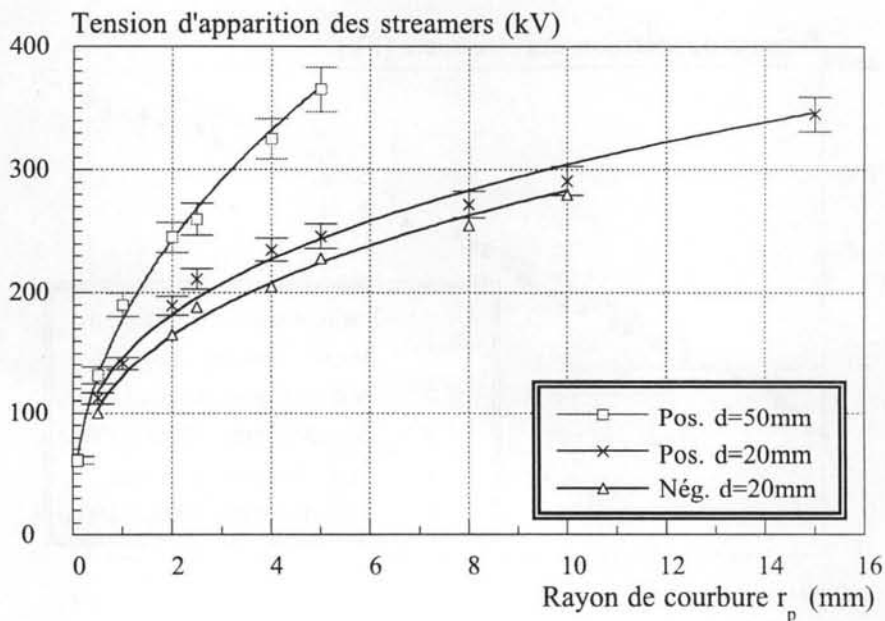


Figure 4.17: Tension d'apparition des streamers dans l'huile de transformateur sous tension impulsionnelle en géométrie tige-plan ($d = 20$ mm et $d = 50$ mm).

4.1.5 ANALYSE DES RESULTATS EN CHAMP DIVERGENT

4.1.5.1 Forme et vitesse des streamers

- i) les streamers lents observés à basse tension avec des faibles rayons de courbure ($r_p < 2\mu\text{m}$ en positif et $r_p < 30\mu\text{m}$ en négatif), quelle que soit la polarité, sont très semblables: une forme en buisson, une propagation partielle au voisinage de la pointe avec des vitesses de l'ordre de quelques centaines de m/s, qui augmentent avec la tension;
- ii) les streamers positifs filamenteux se composent d'un nombre important de filaments plus ramifiés que dans les hydrocarbures saturés. Ils sont très semblables aux streamers générés dans le cyclohexane en ajoutant une concentration importante de pyrène [GOUR94a, JUNG97]. Ceci provient certainement de la présence de nombreuses molécules aromatiques dans l'huile de transformateur (voir annexe A.1). Leur vitesse est constante ($\approx 2\text{km/s}$) sur une large gamme de tensions appliquées et n'augmente que pour les fortes surtensions.

4.1.5.2 Tension d'apparition

La synthèse des mesures de la tension de génération en géométrie pointe-plan et tige-plan est présentée sur la figure 4.18

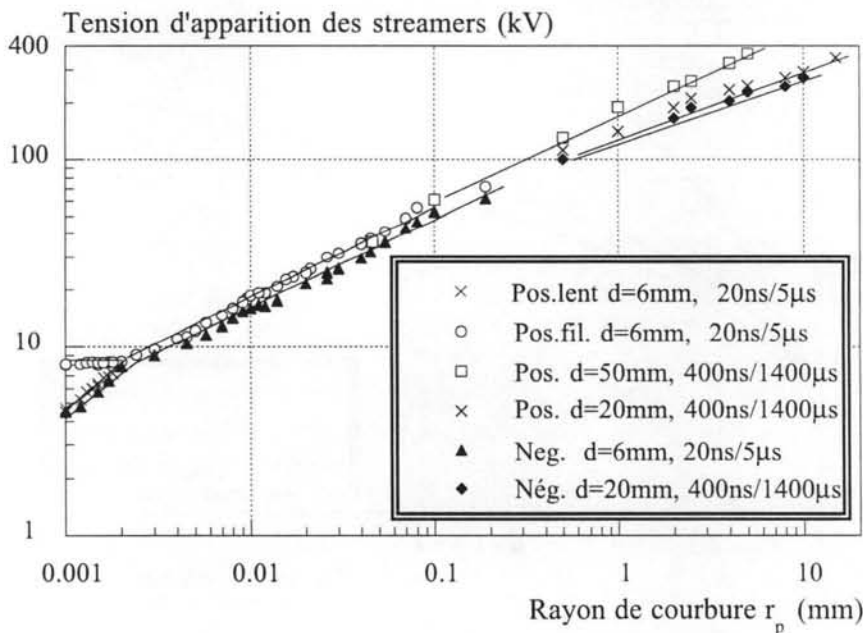


Figure 4.18: Synthèse des mesures de tension d'apparition à 50% des streamers dans l'huile de transformateur sous tension impulsionnelle.

Ces résultats permettent d'obtenir les conclusions suivantes:

- i) les tensions d'apparition des streamers positifs et négatifs varient de façon identique dans une large gamme de rayon de courbure des électrodes (de 1 μm à 10 mm);
- ii) les streamers négatifs apparaissent toujours pour des tensions plus basses (d'environ 5%) que celles des streamers positifs;
- iii) il existe une tension minimale nécessaire pour la propagation des streamers positifs filamenteux dans l'huile ($V_f \approx 8 \text{ kV}$ pour $d = 6 \text{ mm}$) et un rayon critique plus faible que celui mesuré dans la plupart des hydrocarbures ($r_c = 2 \mu\text{m}$ dans l'huile);

4.1.5.3 Champ de génération des streamers

La variation du champ de génération de streamers (E_g) en fonction du rayon de courbure est présentée sur la figure 4.19. Pour $r_p < 0,5 \text{ mm}$, E_g a été calculé avec l'approximation hyperboloïde (équation 1.2). Pour des tiges de rayon de courbure $r_p > 0,5 \text{ mm}$, le champ de génération a été obtenu par le calcul numérique à l'aide du logiciel CSP.

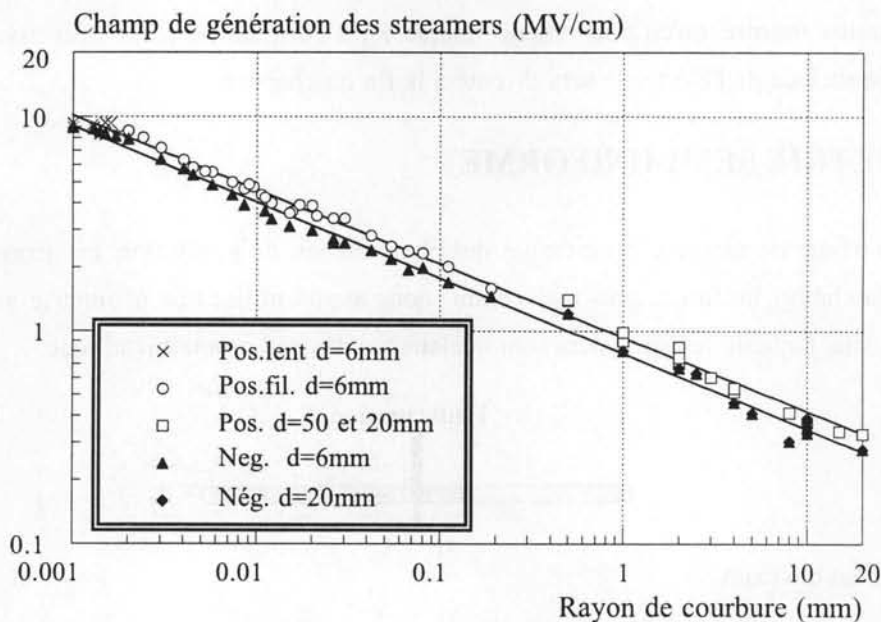


Figure 4.19: Champ de génération des streamers en fonction du rayon de courbure de l'électrode.

Ce calcul montre que dans les deux polarités, les champs de génération décroissent régulièrement et d'une manière identique sur une large gamme de r_p . Nos mesures montrent une décroissance du champ de génération en $E_g \propto r_p^{-0,4}$. Pour des pointes de rayon de courbure inférieur à $2 \mu\text{m}$, les champs de génération des streamers positifs sont proches de 9 MV/cm , ce qui est très comparable aux champs de génération mesurés dans divers hydrocarbures [GOUR94a].

Pour des tiges de quelques dizaines de mm de rayon, les streamers peuvent être générés pour des champs de $300\text{-}400 \text{ kV/cm}$, ce qui est proche de la rigidité mesurée en champ uniforme sous

tension impulsionnelle dans l'huile avec des électrodes de surface équivalente (quelques cm^2) [TRIN82].

Dans ces expériences, l'influence de certains paramètres importants sous tension alternative a disparu :

- influence des charges injectées;
- influence de l'eau (voir plus loin figure 4.23);
- influence des particules.

Ce dernier point n'a pas été mesuré systématiquement, mais il est certainement vérifié. Lors de mesures de tensions de claquage en champ uniforme sous choc de foudre (onde $1/50 \mu\text{s}$), l'écart mesuré entre une huile très bien filtrée et une huile fortement polluée est de l'ordre de 10% avec diverses électrodes de tailles très variables [IREQ95, TRIN82].

Donc les seuls paramètres à considérer pour expliquer la décroissance du champ sont les mécanismes intrinsèques de génération des streamers et les phénomènes dus à la surface de l'électrode. Le fait qu'une variation identique dans les deux polarités soit observée sur toute la gamme de mesure montre qu'un phénomène unique est à l'origine de cette décroissance. Le rôle d'aspérités à la surface de l'électrode sera discuté à la fin du chapitre.

4.2 GEOMETRIE SEMI-UNIFORME

Afin de passer de manière progressive des phénomènes de génération en géométrie pointe-plan au cas du champ uniforme plus mal connu, nous avons utilisé une géométrie semi-uniforme (figure 4.20) dans laquelle les streamers sont déclenchés par une pointe métallique.

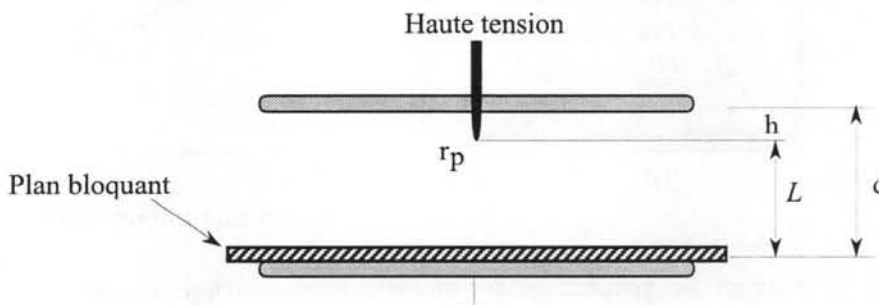


Figure 4.20: Présentation de la géométrie semi-uniforme

Notations et symboles:

- r_p : rayon de courbure de la pointe;
- d : distance entre les électrodes planes;
- L : distance entre la pointe et le plan opposé;
- h : dépassement de la pointe.

En faisant varier la taille de la pointe, nous avons pu étudier l'influence de ses dimensions sur le déclenchement du streamer, dans le but de simuler, une aspérité en champ uniforme.

4.2.1 DESCRIPTION DES PHENOMENES OBSERVES

En comparaison avec la géométrie pointe-plan, la présence du plan situé en arrière de la pointe entraîne des conséquences sur la génération et la propagation des streamers. Le plan provoque un effet d'écran électrostatique qui diminue le champ sur la pointe et rend la génération plus difficile. De même, lorsqu'un streamer est généré, le champ agissant sur celui-ci est plus faible et il se propage plus difficilement.

4.2.1.1 Effet sur la forme des streamers

Selon la taille de la pointe, l'aspect et le comportement des streamers sont similaires à ceux observés en géométrie pointe-plan ou en géométrie uniforme. Sur la figure 4.21, nous présentons quelques images des streamers observés dans cette géométrie.

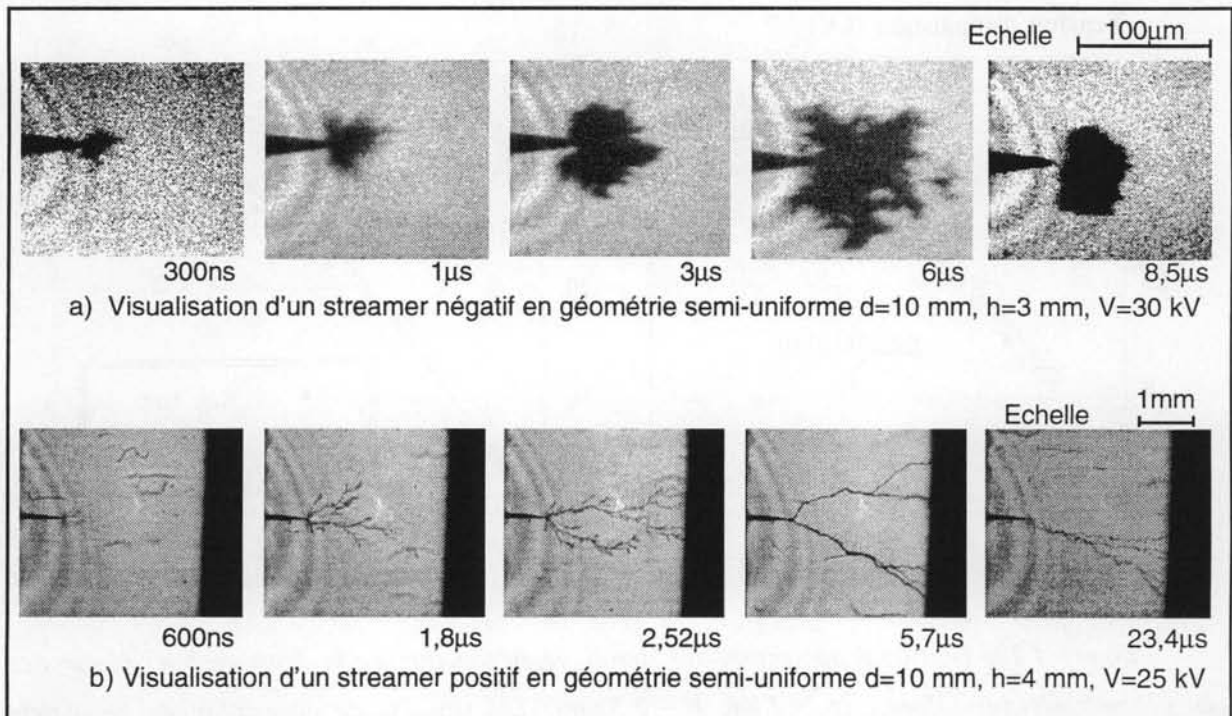


Figure 4.21: Streamer négatif et streamer positif en géométrie semi-uniforme ($r_p = 10 \mu\text{m}$, $d = 11$ mm, $h = 4$ mm) dans l'huile de transformateur.

- les streamers en buisson ont un aspect massif, similaire à ceux observés en géométrie divergente pointe-plan;
- en géométrie pointe-plan, les filaments sont dirigés de façon radiale autour de la pointe, mais en semi-uniforme ils s'allongent plutôt le long de l'axe inter-électrodes. Les streamers positifs filamenteux sont moins ramifiés et leurs filaments sont plus dirigés selon les lignes du champ électrique.

4.2.1.2 Effet sur la tension d'apparition des streamers

- pour des pointes qui dépassent beaucoup du plan, le champ est fortement divergent. Les streamers sont générés et se propagent de façon identique à ceux observés en pointe-plan.
- pour de petits dépassements de la pointe, le facteur de renforcement de champ devient plus faible. La tension d'apparition des streamers augmente rapidement lorsque on diminue la longueur de la pointe. A la limite du générateur haute tension ($\pm 80\text{kV}$), nos expériences ont été réalisées pour des pointes d'un rayon maximum de $23\mu\text{m}$ et d'une longueur minimale $0,2\text{mm}$.

La figure 4.22 montre un exemple de mesure de la tension d'apparition en fonction de la distance inter-électrodes (d et L) pour une pointe de rayon de courbure $r_p = 1\mu\text{m}$ et d'une longueur $h = 0,5\text{mm}$.

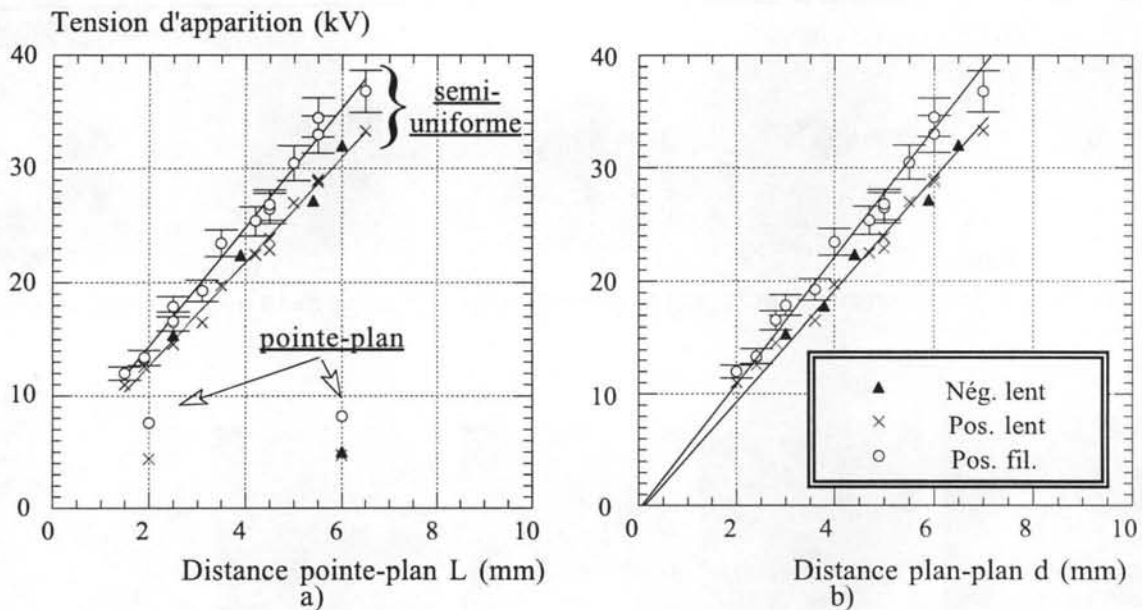


Figure 4.22: Tension d'apparition des streamers en fonction de la distance inter-électrodes en géométrie semi-uniforme ($r_p = 1\mu\text{m}$, $h = 0,5\text{mm}$). Les tensions de génération en géométrie pointe-plan ont été obtenues dans l'étude précédente pour $r_p = 1\mu\text{m}$, $L = 6\text{mm}$ et par Gournay [GOUR94a] pour $r_p = 1,2\mu\text{m}$, $L = 2\text{mm}$ dans l'huile de transformateur Nytro 10G.

En géométrie semi-uniforme, on constate que la tension d'apparition croît d'une manière linéaire lorsque l'on éloigne les électrodes. Le premier graphe de la figure 4.22 présente la variation de la tension d'apparition $V_g(L)$ en fonction de la distance entre la pointe et le plan qui lui fait en face. Les courbes $V_g(d)$ montrent également une variation linéaire, mais de plus la droite de variation passe par l'origine de la figure. Ceci montre que les streamers apparaissent pour une valeur constante du champ moyen $E_o = V_g/d$.

Avec les courbes $V_g(L)$, l'influence du plan situé en arrière de la pointe peut être jugée. Pour une pointe de rayon $r_p = 1\mu\text{m}$ et $h = 0,5\text{ mm}$, la tension d'apparition des streamers est environ 4 fois supérieure à celle mesurée dans les mêmes conditions en géométrie pointe-plan.

En géométrie semi-uniforme, les paramètres déterminant l'apparition des streamers sont le rayon de courbure r_p , la longueur h de la pointe et la distance d . Dans ce qui suit, nous présenterons une étude de l'influence de ces paramètres sur la tension de génération des streamers.

4.2.1.3 Influence de la teneur en eau

L'influence de la pollution sur la génération des streamers dépend de la forme de la tension et de la durée d'application. Cet effet a été étudié sous tension alternative (chapitre précédent). Sous créneaux de tension de courte durée et de temps de montée très rapide, nous considérons que l'effet de la pollution est négligeable. Cette hypothèse a été vérifiée dans les expériences réalisées en ajoutant des quantités croissantes d'eau (de 15 ppm jusqu'à 50 ppm), nous avons constaté que la tension de génération des streamers n'est pas affectée (figure 4.23).

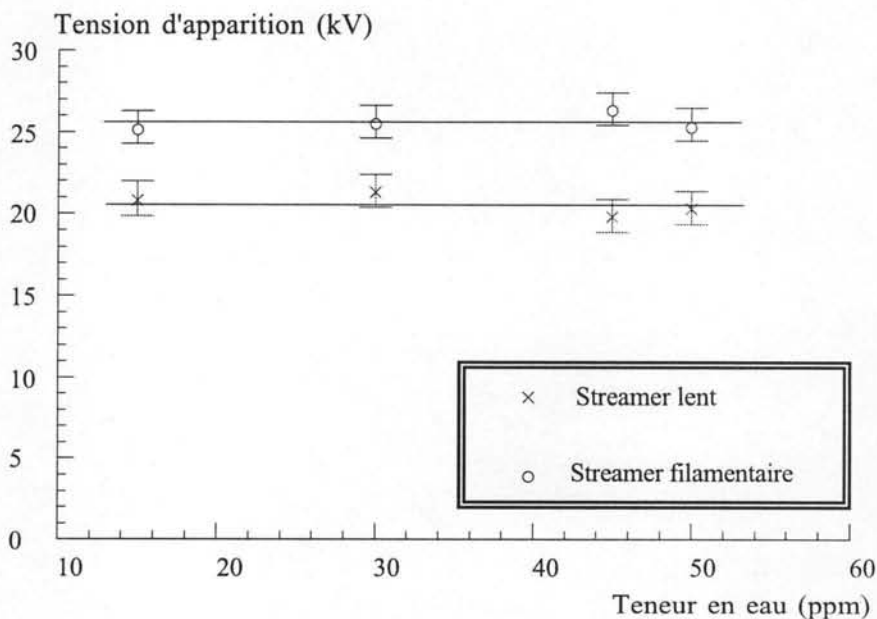
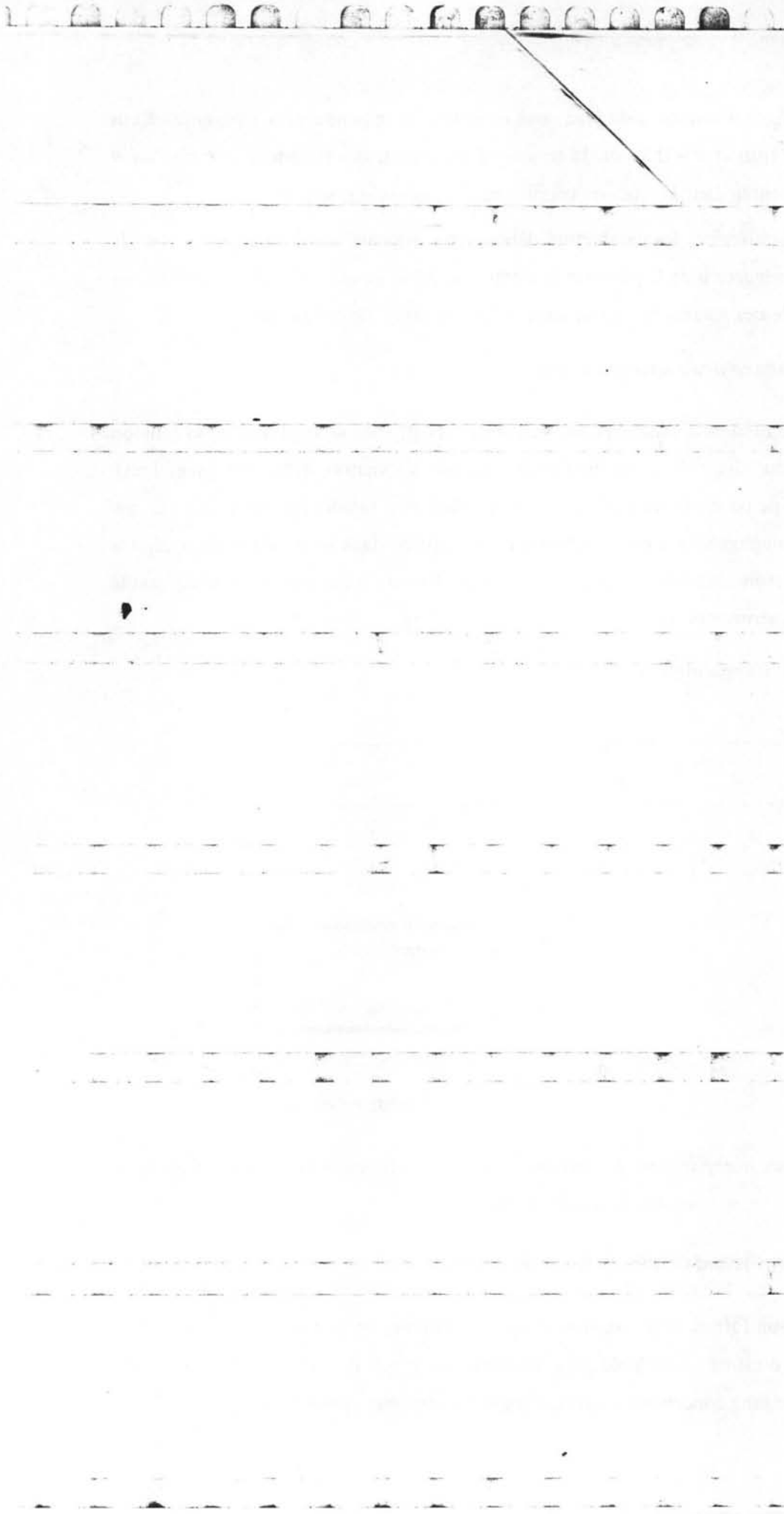


Figure 4.23: Tension d'apparition des streamers positifs en fonction de la teneur en eau. Géométrie semi-uniforme : $r_p = 1\mu\text{m}$, $h = 1\text{ mm}$, $d = 6\text{ mm}$.

4.2.2 INFLUENCE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES

En géométrie semi-uniforme, nous constatons que l'évolution de la tension de génération avec les paramètres h , r_p , d est très semblable pour les différents types de streamers. Les résultats que nous présentons ci-dessous concernent essentiellement les streamers positifs filamenteux.



Le champ moyen
pointe est petite. Pour h

4.2.2.2 Inj

En fixant la dista
en géométrie pointe-pl
longueurs de pointe h.

On constate que
courbe $V_g(h)$ tend vers
4.27)

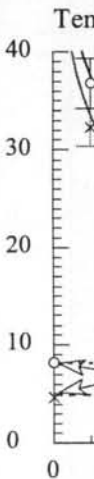


Figure 4.26: Co
semi-uniforme et pointe

Les tensions d'ap
noter que la source de
streamers avec de très
mesure précise de très p

Lorsque la distan
variation de la tension
 $r_p = 1\mu\text{m}$ et $L = 6\text{mm}$, a

S
St
Stream

Le champ moyen d'apparition des streamers E_0 est d'autant plus grand que la longueur h de la pointe est petite. Pour h fixe, il reste constant, quelque soit la distance d .

4.2.2.2 Influence de la longueur h de la pointe

En fixant la distance L entre la pointe et le plan à 6 mm (afin de comparer avec les résultats en géométrie pointe-plan), on déplace le plan situé derrière la pointe pour obtenir différentes longueurs de pointe h .

On constate que plus la pointe dépasse du plan, plus la tension de génération diminue. La courbe $V_g(h)$ tend vers la valeur mesurée en géométrie divergente pointe-plan (figures 4.26 et 4.27)

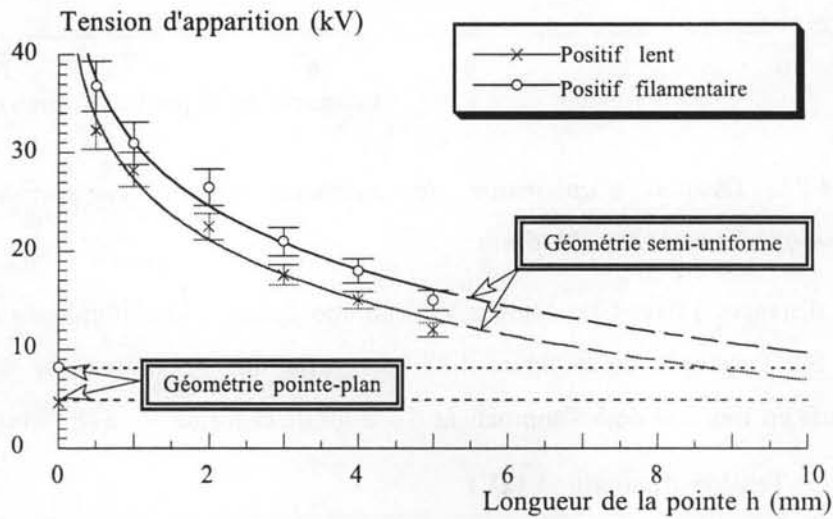


Figure 4.26: Comparaison des tensions d'apparition des streamers positifs en géométries semi-uniforme et pointe-plan : $r_p = 1 \mu\text{m}$, $L = 6 \text{ mm}$.

Les tensions d'apparition augmentent très rapidement pour les faibles valeurs de h . Il est à noter que la source de tension disponible ne permet pas de mesurer la tension d'apparition des streamers avec de très petites longueurs h ou avec des pointes de rayon important. De plus, la mesure précise de très petites longueurs (moins de $100 \mu\text{m}$) est difficile.

Lorsque la distance L est maintenue constante, et que l'on fait diminuer la longueur h , la variation de la tension d'apparition est proche d'un accroissement de forme $V = a - b \cdot \log(h)$. Pour $r_p = 1 \mu\text{m}$ et $L = 6 \text{ mm}$, a et b sont donnés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1

	a	b
Streamer négatif	26,1	19,0
Streamer positif lent	27,3	20,4
Streamer positif filamentaire	31,0	21,4

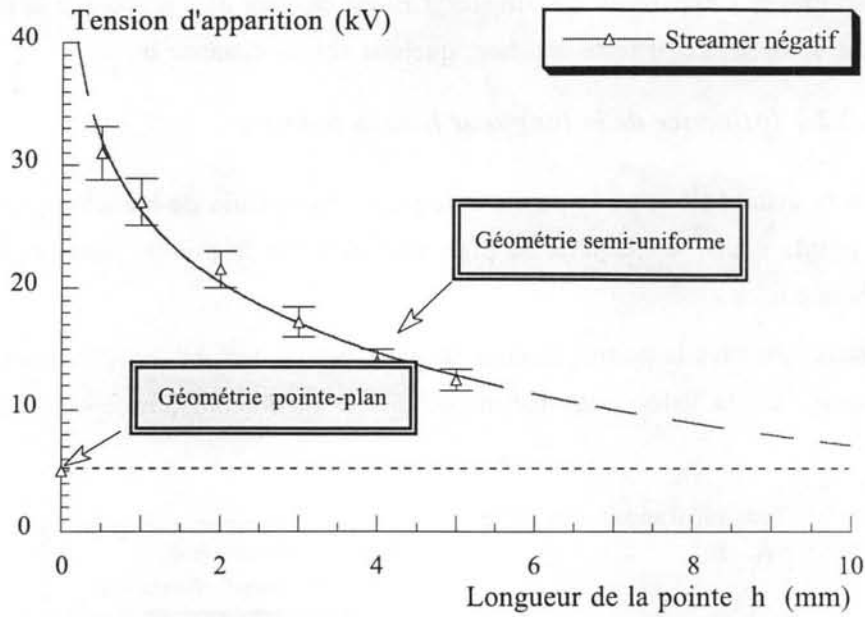


Figure 4.27: Tensions d'apparition des streamers négatifs en semi-uniforme et en géométrie pointe-plan : $r_p = 1 \mu\text{m}$, $L = 6 \text{ mm}$

Pour des distances d fixées, les courbes $V(h)$ en coordonnées logarithmiques sont des droites (figure 4.28). Sur l'exemple de la figure 4.28, les variations de la tension d'apparition des streamers positifs en fonction de h s'approchent d'une loi de la forme $V = a \cdot h^{-b}$ avec $b \approx 0,65$.

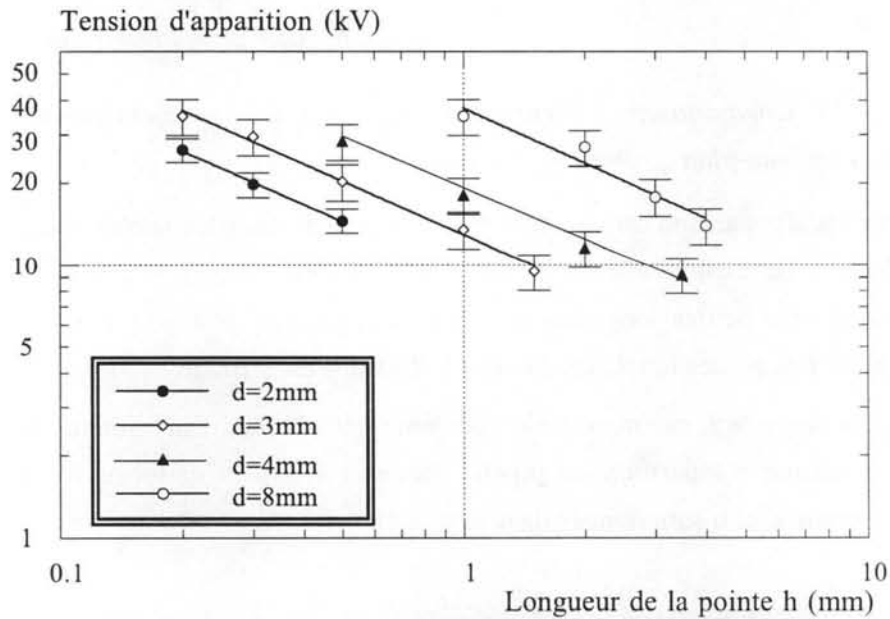


Figure 4.28: Tension d'apparition des streamers positifs filamenteux en fonction du dépassement de la pointe h pour différentes d ($r_p = 1 \mu\text{m}$).

4.2.2.3 Influence du rayon de courbure de la pointe

Dans ces essais, nous avons mesuré la tension d'apparition des streamers en faisant varier le rayon de courbure de la pointe pour une distance inter-électrodes d fixe mais avec différentes longueurs h . Les mesures ont été effectuées pour des rayons de courbure jusqu'à $23\mu\text{m}$ dans la limite de la tension disponible. Nous avons observé :

- en polarité négative, les streamers sont similaires à ceux observés en géométrie pointe-plan;
- en polarité positive, les deux modes de streamers ont été observés pour des pointes de $r_p = 1\mu\text{m}$, c'est-à-dire, inférieur au rayon critique mesuré en géométrie pointe-plan ($r_c \approx 2\mu\text{m}$). Pour des pointes de rayon $r_p = 3\mu\text{m}$, nous n'avons observé que des streamers filamenteux. Cela prouve l'existence du rayon critique identique à celui observé en géométrie pointe-plan;
- pour h et d fixés, l'accroissement du rayon de courbure de la pointe entraîne l'augmentation de la tension d'apparition des streamers.

L'influence du rayon de la pointe r_p sur la tension d'apparition des streamers est présentée sur les figures 4.29 et 4.30.

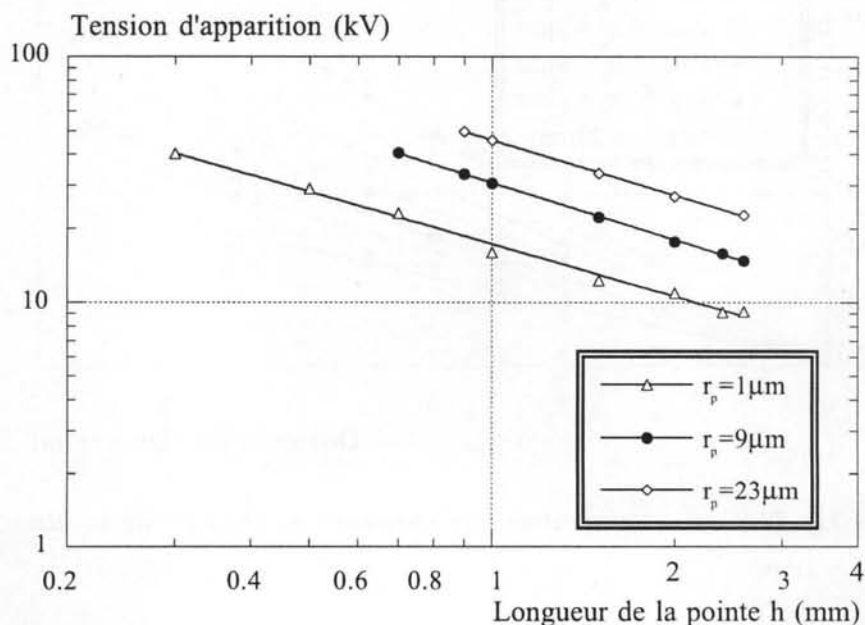


Figure 4.29: Tension d'apparition des streamers positifs filamenteux en fonction de la longueur de la pointe h ($d = 4\text{ mm}$).

On note également qu'à tension élevée ($r_p = 23\mu\text{m}$ et pour $h < 1\text{ mm}$), des claquages du plan bloquant se sont produits très souvent.

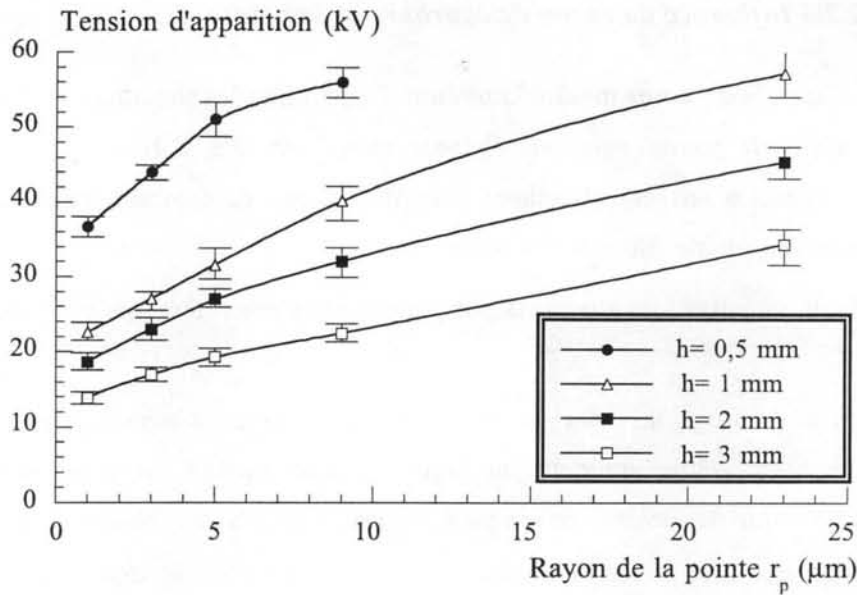


Figure 4.30: Tension d'apparition des streamers en fonction du rayon de courbure de la pointe pour différentes longueurs h ($d = 4$ mm).

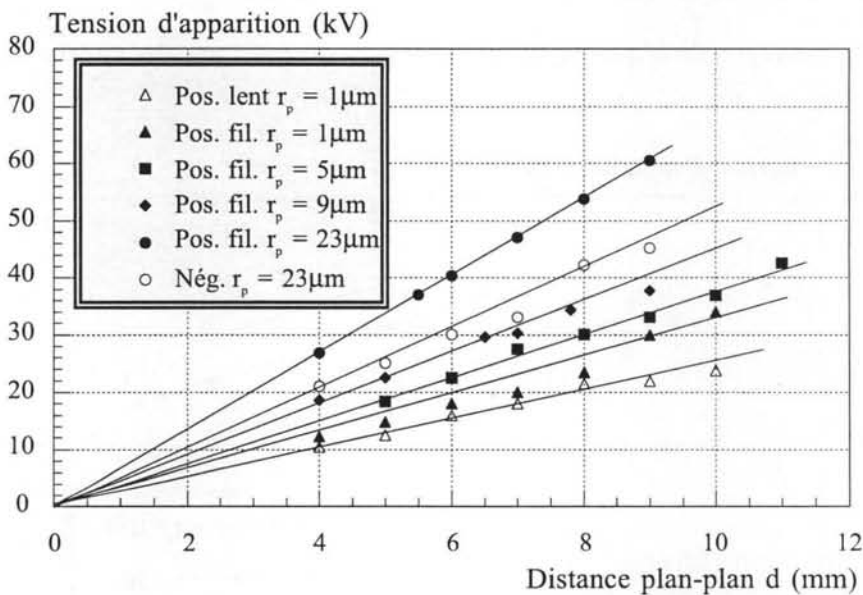


Figure 4.31: Tension de génération des streamers en fonction de la distance d et pour différents r_p ($h = 2$ mm).

On note qu'au-dessous du rayon critique ($r_p < r_c$), les mesures précises sont difficiles. En géométrie semi-uniforme sous tension élevée, le processus d'érosion de la pointe très fine est plus marqué qu'en géométrie pointe-plan. Avec une pointe de $1\mu\text{m}$ au début d'expérience, nous avons constaté une disparition progressive des streamers positifs lents. Ce phénomène est expliqué par le fait que l'apparition des streamers a érodé la pointe très fine et fait augmenter le rayon de courbure au-dessus du rayon critique. Une fois les mesures terminées, nous avons en effet mesuré un rayon de $2\mu\text{m}$.

4.2.3 ANALYSE DES RESULTATS EN GEOMETRIE SEMI-UNIFORME

4.2.3.1 Commentaires

Suivant la taille de l'électrode d'amorçage, la géométrie semi-uniforme s'approche soit d'une géométrie divergente pointe-plan, soit d'une géométrie uniforme plan-plan. Nous avons trouvé les conditions d'apparition des streamers sur la pointe comparables à celles rapportées en géométrie pointe-plan : existence d'un rayon critique, tension d'apparition des streamers négatifs plus basse. Cependant, la présence du plan affecte de manière très importante la tension de génération et la forme des streamers. L'effet est plus ou moins marqué et sous la dépendance de tous les paramètres géométriques.

La variation de la tension de génération des streamers avec les paramètres r_p , h et d peut être expliquée par l'amplification du champ uniforme plan-plan $E_0 = V/d$ par la pointe.

4.2.3.2 Champ moyen de génération

Nous avons montré que le champ moyen E_0 d'apparition des streamers dépend de la taille de l'électrode d'amorçage (rayon de courbure et dépassement), mais non de la distance inter-électrodes (voir § 4.2.2). Pour r_p et h fixés, le champ E_0 est constant quelle que soit la distance entre les plans dans la limite dans laquelle la géométrie plan-plan reste uniforme, compte tenu de la taille des plans. Dans notre étude, cette distance varie jusqu'à 20 mm.

Les variations de E_0 avec r_p et h sont présentées sur les figures 4.32 et 4.33.

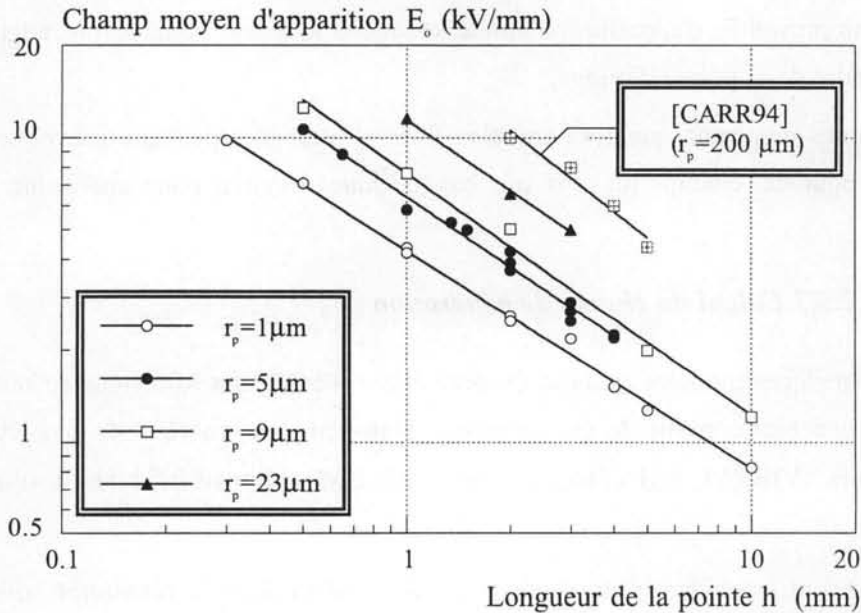


Figure 4.32: Champ moyen d'apparition des streamers positifs en fonction de la longueur de la pointe.

Sur la figure 4.32, nous avons rapporté également les champs moyens de claquage mesurés par Carraz [CARR94] avec une particule cylindrique en tungstène ($r_p = 0,2\text{ mm}$) fixée sur une électrode. Ces résultats ont été obtenus sous impulsions de tension dans l'huile de transformateur, en utilisant deux électrodes planes séparées de 20 mm. Les résultats sont comparables à nos mesures.

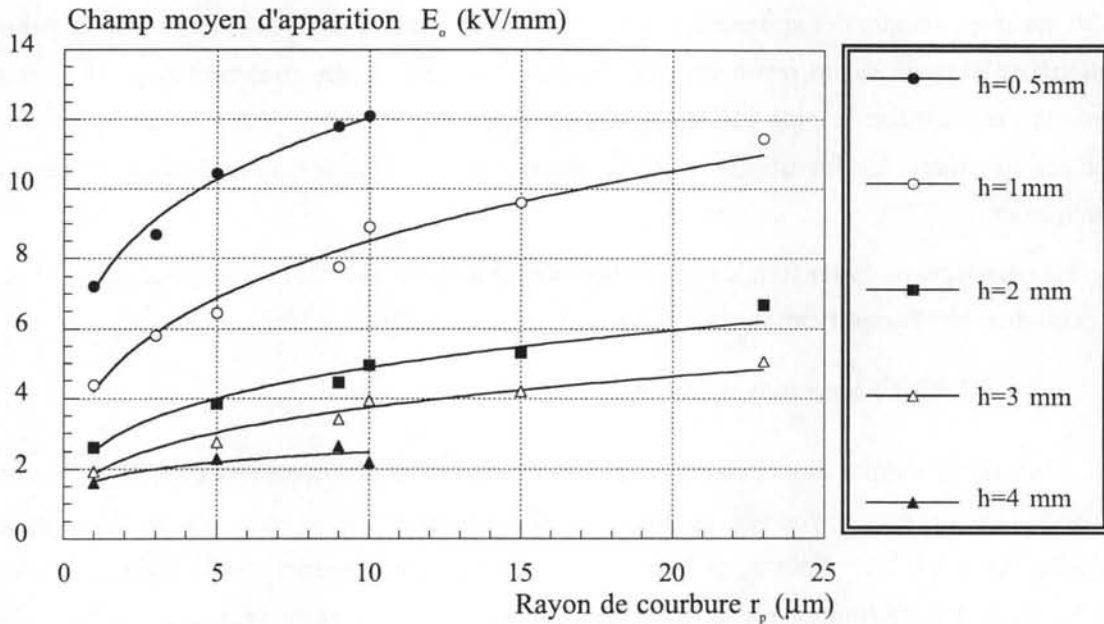


Figure 4.33: Champ moyen d'apparition des streamers positifs filamentaires en fonction du rayon de courbure de la pointe.

Le champ moyen E_0 d'apparition diminue lorsque la longueur de la pointe augmente et/ou le rayon de courbure de la pointe diminue.

Ces mesures montrent que des particules fines et allongées peuvent provoquer l'apparition des streamers pour des champs moyens très bas (quelques kV/mm pour une pointe $r_p = 1\ \mu\text{m}$ et $h = 1\text{ mm}$).

4.2.3.3 Calcul du champ de génération

Il existe quelques modèles analytiques permettant de calculer le facteur de renforcement du champ β par une petite particule en géométrie plan-plan. Le coefficient β a été calculé par plusieurs auteurs [VIBR64, CHAT66, FELI66, MILL67] pour différentes formes de défauts (§1.2.4).

Les pointes utilisées dans notre étude ont la forme d'un objet de révolution allongé. Il existe deux modèles qui s'approchent du profil de la pointe (figure 4.34) :

- soit un cylindre à l'extrémité hémisphérique de même rayon que la pointe;
- soit un demi-éllipsoïde de rayon de courbure r_p .

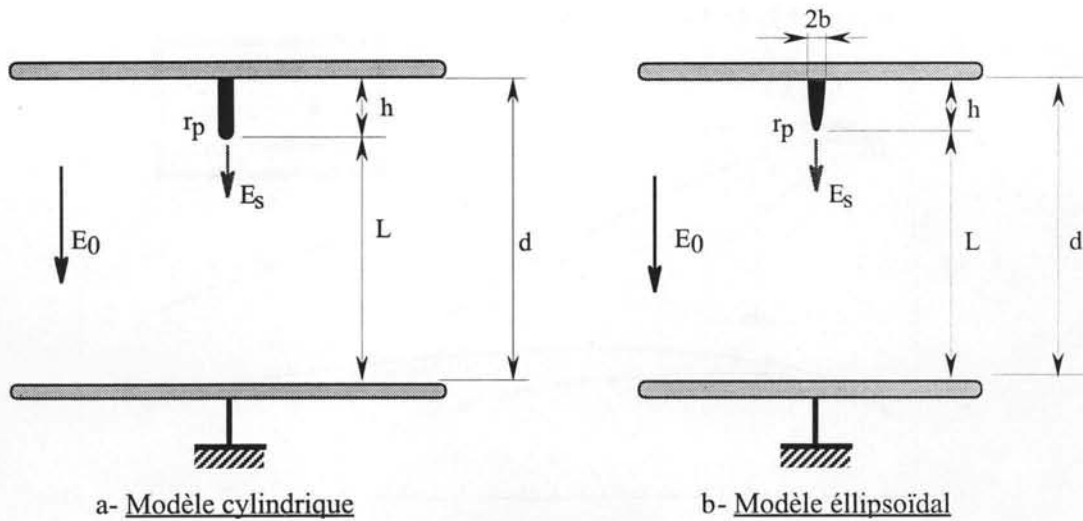


Figure 4.34: Modèles de particules posées sur le plan a) cylindrique et b) demi-éllipsoïde de révolution.

a) Modèle d'un cylindre (figure 4.34a)

Ce modèle a été proposé par Vibrans [VIBR64]. Le facteur du renforcement de champ à l'extrémité de la particule varie selon le dépassement h et le rayon de courbure r_p (voir § 1.2.4). Un coefficient de correction a été introduit par Miller [MILL67] pour des pointes de longueur non négligeable devant la distance entre les plans d (expression 1.7).

En comparant la pointe à un cylindre, il y a deux possibilités pour le rayon du cylindre. Soit nous considérons que le cylindre a le même rayon que la pointe (r_p), soit que le cylindre a pour rayon celui du fil de tungstène ($50\mu\text{m}$). Dans le deuxième cas, les champs de génération calculés sont sous-estimés ($0,3$ à $0,7\text{MV/cm}$) et sont indépendants des différents rayons de courbure de pointes fabriquées. On considéra donc seulement le premier cas : le cylindre a le même rayon que la pointe.

Les résultats, calculés pour $r_p = 1\mu\text{m}$ et $5\mu\text{m}$, sont présentés sur la figure 4.35.

Pour deux pointes de $r_p = 1\mu\text{m}$ et $r_p = 5\mu\text{m}$, les champs de génération calculés sont largement supérieurs aux valeurs mesurées au § 4.1.1 en géométrie pointe-plan ($9,5\text{MV/cm}$ pour $r_p = 1\mu\text{m}$ et $4,5\text{MV/cm}$ pour $r_p = 5\mu\text{m}$). De plus, les champs de génération calculés par ce modèle varient largement lorsque on change la distance d ou la longueur de la pointe.

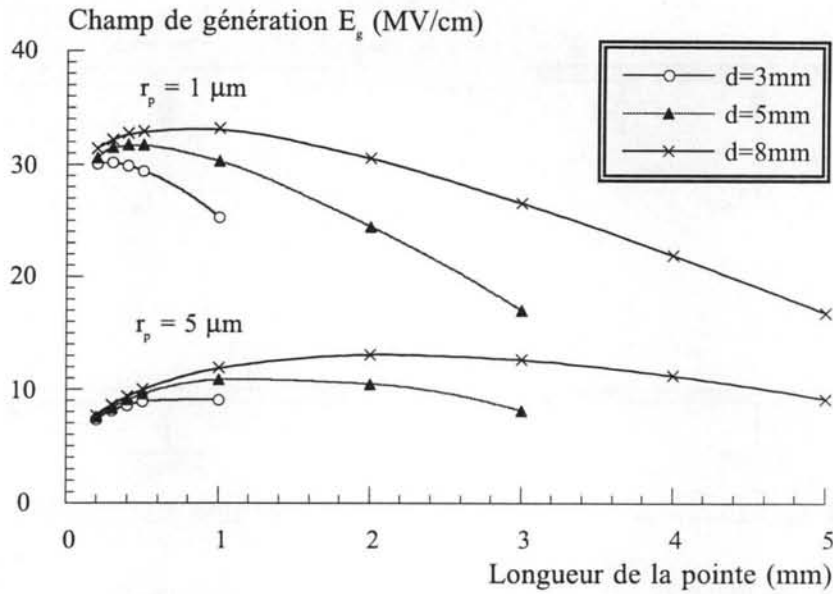


Figure 4.35: Champ de génération des streamers positifs calculé avec le modèle cylindrique en fonction de la distance et de la longueur ($r_p = 1 \mu\text{m}$ et $5 \mu\text{m}$).

b) Modèle d'un demi-éllipsoïde (figure 4.34b)

Le deuxième modèle consiste à assimiler la pointe à un demi-éllipsoïde de longueur h et de rayon r_p , posée sur le plan. La pointe étant sensiblement conique, ce modèle s'approche plus de la réalité que le modèle précédent. Le facteur de renforcement du champ à l'extrémité d'une particule de telle forme a été établi par Félici [FELI66]. Le coefficient de correction de Miller est toujours valable pour des pointes longues. On obtient la formule 4.1 pour le coefficient de renforcement du champ.

$$\beta = \frac{h^2}{b^2} \frac{1}{\ln h - 1} \frac{L}{d} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

ou h et b sont respectivement le grand et le petit axes de l'ellipse.

Dans ce modèle, nous imposons le rayon réel de courbure de la pointe. Il nous faut calculer les paramètres b de l'ellipse avec :

$$r_p = \frac{b^2}{h} \quad \text{d'où} \quad b = \sqrt{hr_p} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Les champs de génération des streamers calculés avec ce modèle sont présentés sur la figure 4.36 pour $r_p = 1 \mu\text{m}$ et $5 \mu\text{m}$.

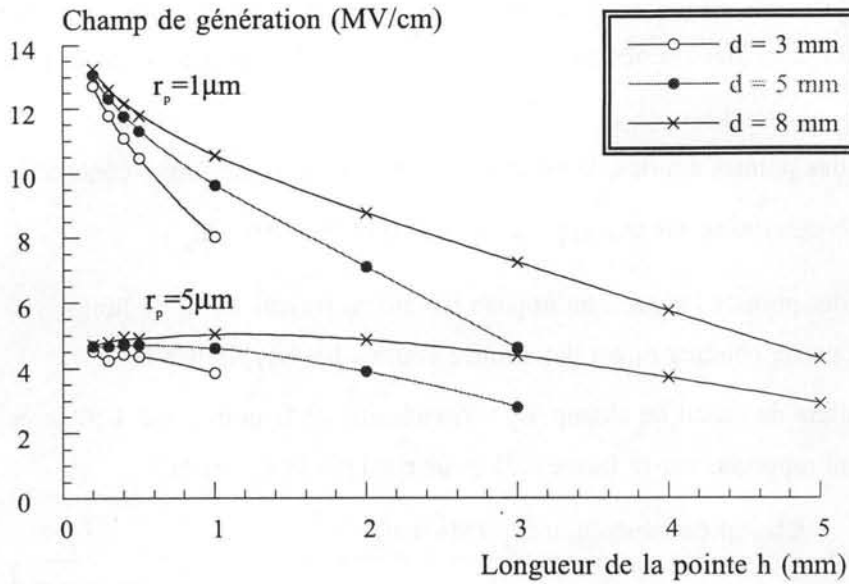


Figure 4.36: Champ de génération des streamers positifs si l'on assimile la pointe à un demi-ellipsoïde.

Le calcul montre que les champs de génération sont plus proches des champs mesurés en géométrie pointe-plan pour les cas où $h \ll d$.

Cependant, de même que dans le modèle cylindrique, les pointes de longueurs importantes donnent une mauvaise corrélation avec les résultats en géométrie pointe-plan.

c) Calcul numérique du champ de génération par CSP

Le logiciel CSP permet de calculer le champ avec une géométrie très proche de la forme réelle de la pointe. Selon les cas, la pointe est assimilée soit à une pointe conique (pointe courte figure 4.37a), soit à une tige comportant une partie conique (h_1) et une partie cylindrique (h_2) (figure 4.37b) dont les dimensions sont déduites de la forme réelle de la pointe.

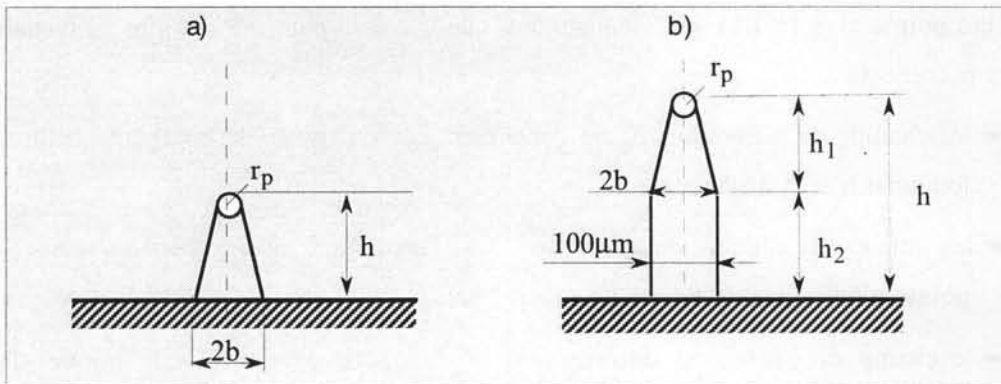


Figure 4.37: Présentation des paramètres de la pointe utilisés dans le calcul par CSP.

Dans ces calculs, on impose le rayon de courbure de la pointe. Les paramètres de la pointe de la figure 4.37 sont déterminés par le rayon r_p et par la longueur h de la pointe de manière suivante :

- pour des pointes courtes, la pointe est remplacée par une forme conique avec le rayon de base b déterminé par une approximation elliptique ($b = \sqrt{hr_p}$).
- pour des pointes longues, on impose $b = 50\mu\text{m}$ (rayon du fil de tungstène) et la longueur de la partie conique h_1 est déterminée comme $h_1 = b^2/r_p$ et $h_2 = h - h_1$.

Les résultats du calcul du champ E_g à l'extrémité de la pointe par CSP avec les différentes longueurs h sont rapportés sur la figure 4.38 pour $r_p = 1\mu\text{m}$ et $r_p = 9\mu\text{m}$.

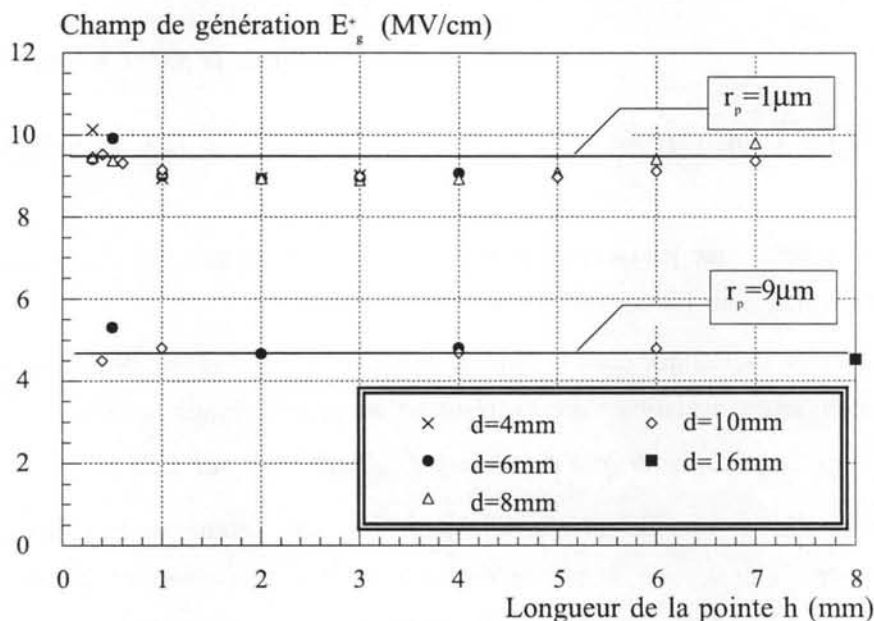


Figure 4.38: Champ de génération des streamers positifs calculé par CSP.

En comparant avec les champs de génération obtenus précédemment en géométrie divergente pointe-plan (§ 4.1), nous constatons que le calcul par CSP est plus convenable que les modèles précédents :

- les champs de génération E_g ne dépendent que du rayon de courbure quelle que soit la longueur h et la distance d ;
- les valeurs des champs de génération sont identiques en géométries semi-uniforme et pointe-plan pour une pointe de rayon fixé;
- le champ de génération diminue avec le rayon de courbure de la pointe d'une façon identique (figure 4.39). La tendance observée dans nos essais est cohérente avec les résultats rapportés par Carraz [CARR95] pour des pointes de rayon $200\mu\text{m} \leq r_p \leq 700\mu\text{m}$.

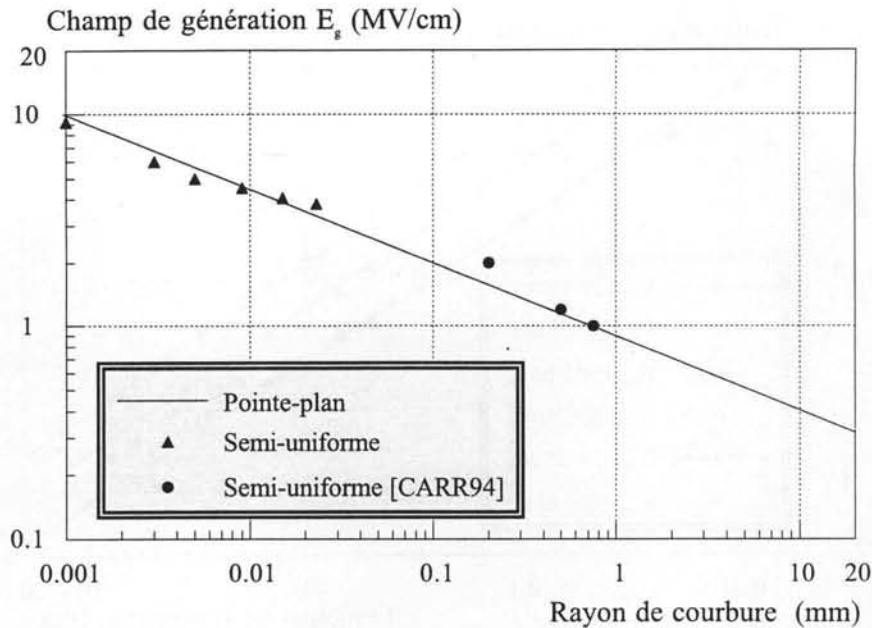


Figure 4.39: Champ de génération des streamers positifs en fonction du rayon de courbure en géométrie pointe-plan et semi-uniforme.

La bonne corrélation des champs de génération des streamers dans les deux géométries montre que les conditions de leur apparition sont identiques. Quelle que soit la géométrie, c'est le champ maximum qui détermine la génération des streamers. Pour générer un streamer, ce champ doit atteindre une valeur qui ne dépend que du rayon de courbure de la pointe.

4.2.3.4 Calcul de la tension d'apparition des streamers

En géométrie semi-uniforme, le champ moyen d'apparition des streamers n'est fonction que des paramètres de la pointe r_p et h . De plus, nous avons montré que les champs de génération E_g des streamers pour r_p fixé sont les mêmes qu'en géométrie pointe-plan. Cela rend possible le calcul du champ moyen théorique E_{oth} d'apparition des streamers, et par conséquent de la tension de génération pour une particules de r_p et h connus.

Pour cette pointe, nous calculons le facteur β du renforcement de champ par CSP. Puis, E_{oth} est calculé avec :

$$E_{oth} = \frac{E_g}{\beta} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Nous avons calculé les variations de E_{oth} en faisant varier la longueur h pour 3 pointes de rayon de courbure de $r_p = 1\mu\text{m}$, $9\mu\text{m}$ et $23\mu\text{m}$. Les résultats sont présentés sur la figure 4.40. Les champs de génération E_g déduits des mesures en géométrie pointe-plan sont respectivement égaux à 9,5; 4,5 et 4MV/cm (figure 4.20).

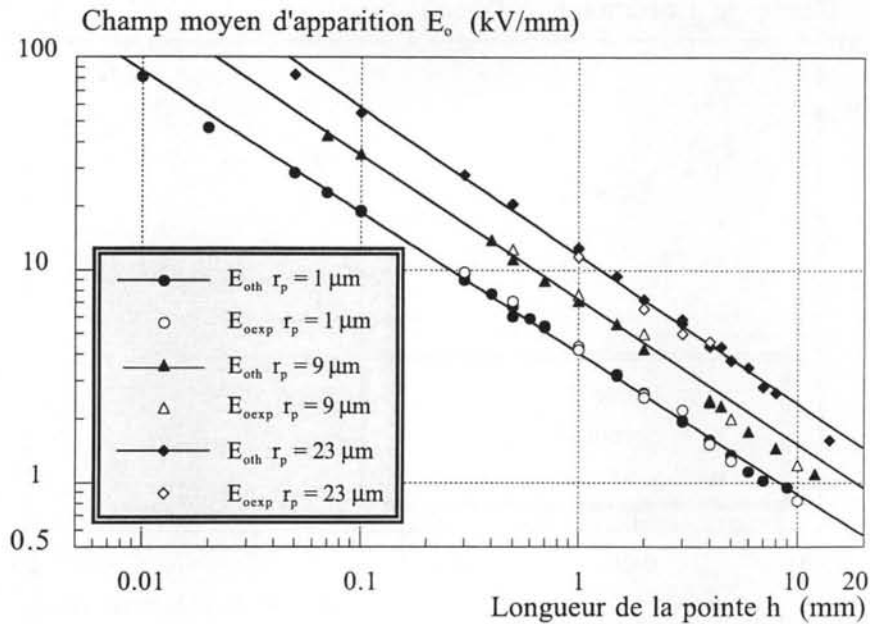


Figure 4.40: Champs d'apparition des streamers positifs calculés E_{oth} (droites) et expérimentaux E_{oexp} en géométrie semi-uniforme en fonction de la longueur de la pointe.

Les résultats du champ calculé sont bien corrélés avec points expérimentaux de E_{oexp} avec l'hypothèse d'un champ de génération constant sur la pointe. La variation de E_0 est proche d'une loi $E_{oth} = a.h^{-2/3}$.

L'extrapolation de E_{oth} pour des particules microscopiques (par exemple $r_p = 1 \mu\text{m}$ et $h = 10 \mu\text{m}$) conduit à des valeurs de l'ordre de 1 MV/cm. Ces valeurs sont effectivement comparables aux champs de claquage mesurés en géométrie uniforme sous impulsions de tension avec des liquides très bien filtrés [CROW54]. Inversement, des champs de claquage aussi faibles que 50 kV/cm sont mesurés dans les conditions les plus défavorables (tension alternative, grands volumes, présence de particules [TRIN82, IREQ95]). Dans ce cas, la figure 4.40 indique que des fibres conductrices d'environ 1 mm de longueur peuvent déclencher des streamers, ce qui constitue une taille réaliste.

4.3 DISCUSSION SUR LA GENERATION DES STREAMERS SOUS CRENEAUX DE TENSION

4.3.1 DECROISSANCE DU CHAMP DE GENERATION AVEC r_p

Dans les expériences sous impulsions de tension, les effets liés à l'injection de charges d'espace ainsi que l'influence de la pollution sont évités. Dans ces conditions, nos mesures, présentées ci-dessus, mettent en évidence l'effet de la géométrie sur la génération des streamers.

Les points importants sont les suivants :

- le champ de génération des streamers E_g diminue lorsque le rayon r_p augmente quelle que soit la géométrie utilisée (divergente ou semi-uniforme);
- le champ E_g dépend essentiellement de r_p et de la nature du liquide;
- dans les mêmes conditions, les streamers négatifs apparaissent toujours pour des champs plus faibles.

En géométrie semi-uniforme, nous avons montré que la génération des streamers s'effectue dans des conditions identiques à la géométrie pointe-plan. Par contre les tensions d'apparition sont nettement plus élevées à cause de l'effet d'écran joué par le plan situé derrière la pointe. Par calcul numérique, on peut calculer les tensions d'apparition si on connaît la taille de l'aspérité et le champ de génération déduit des mesures en géométrie pointe-plan. Ces résultats nous permettent de comprendre le rôle d'aspérités ou de particules à la surface d'une électrode.

Les résultats obtenus avec de petits rayons de courbure ($r_p < 20 \mu\text{m}$) sont cohérents avec ceux mesurés dans divers hydrocarbures [GOUR94a, YAMA98] comme l'indique la figure 4.41. Le champ de génération est comparable dans les deux polarités et diminue de 10 MV/cm à 4 MV/cm lorsque r_p passe de 1 μm à 10 μm . De plus, nos résultats montrent que cette décroissance continue sur une large gamme de rayons r_p (jusqu'à $r_p=20 \text{ mm}$) (voir figure 4.19).

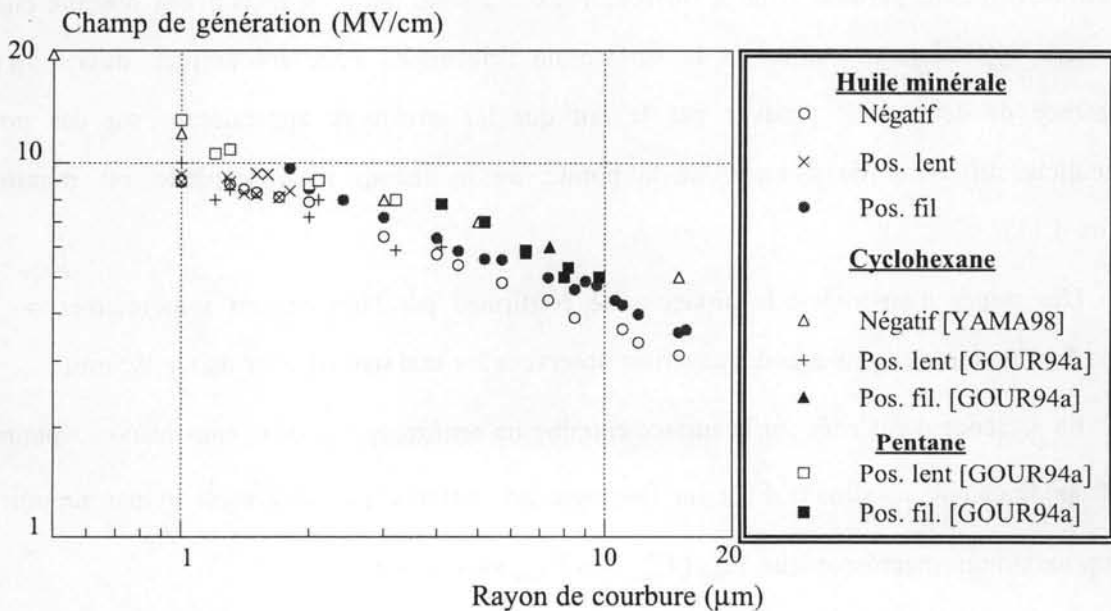


Figure 4.41: Champ de génération des streamers dans différents liquides.

Aucune explication satisfaisante de la diminution de $E_g(r_p)$ n'a été trouvée dans la littérature. Deux mécanismes peuvent expliquer cette diminution : un mécanisme lié au processus physique de génération pour les pointes fines de quelques μm , et un mécanisme lié à l'existence de défauts à la surface de l'électrode pour les pointes plus grosses.

a) Pointes fines

Pour expliquer la génération des streamers négatifs, Denat et al. [HAID91, KATT91] ont montré l'existence d'un mécanisme de multiplication électronique. Ce mécanisme n'est possible que pour des champs supérieurs à un certain champ critique E_i ($E_i \approx 2,5$ MV/cm dans le cyclohexane). La profondeur de la zone de multiplication x_i est de l'ordre du rayon de la pointe (quelques μm). Le critère d'avalanche électronique (champ supérieur à E_i sur une certaine distance) n'est pas satisfait si $r_p < 0,6 \mu\text{m}$ (voir § 1.4). Etant donné que la profondeur de la zone de champ intense augmente avec r_p , cet effet peut expliquer la décroissance du champ de génération pour les pointes très fines (quand $E_g > 2,5$ MV/cm dans le cyclohexane). Cet effet est très comparable à celui connu dans les gaz.

b) Grands rayons de courbure

Lorsque E_g devient sensiblement plus faible (< 1 MV/cm) quand r_p augmente, pour générer un streamer il faut que le champ local atteigne au moins la valeur E_i , c'est-à-dire une valeur plus élevée que le champ macroscopique calculé en supposant que les électrodes ont une surface parfaite. Ce renforcement du champ ne peut être expliqué que par des défauts sur la surface de l'électrode (aspérité, particules sur la surface...). Lors des ces mesures, nous avons observé que les streamers apparaissent toujours à la surface de l'électrode. Pour les pointes de $r_p > 50 \mu\text{m}$, l'existence de défauts est prouvée par le fait que les streamers apparaissent sur des points particuliers différents du sommet de la pointe où le champ macroscopique est maximum (figure 4.11).

L'existence d'aspérités à la surface a été confirmée par l'observation sous microscope. La figure 4.42 montre les plus grandes aspérités observées sur une tige en acier de $r_p = 0,5$ mm.

La présence d'aspérités sur la surface entraîne un renforcement du champ macroscopique de sorte que le champ maximum E_{max}^a sur l'aspérité est renforcé par un facteur m par rapport au champ maximum macroscopique E_{max} ($E_{\text{max}}^a = m E_{\text{max}}$ avec $m \geq 1$).

Le facteur m varie selon la forme et la taille des aspérités et peut être calculé analytiquement ou par le calcul numérique (voir § 1.2.4). Une estimation pratique peut être obtenue en considérant des aspérités sphériques : le champ au sommet d'une demi-sphère métallique de diamètre quelconque posée sur un plan est amplifié par un facteur 3 [FELL66]. Un

empilement de n demi-sphères, renforce donc le champ au sommet de la $n^{\text{ième}}$ sphère par un facteur $m = 3^n$.

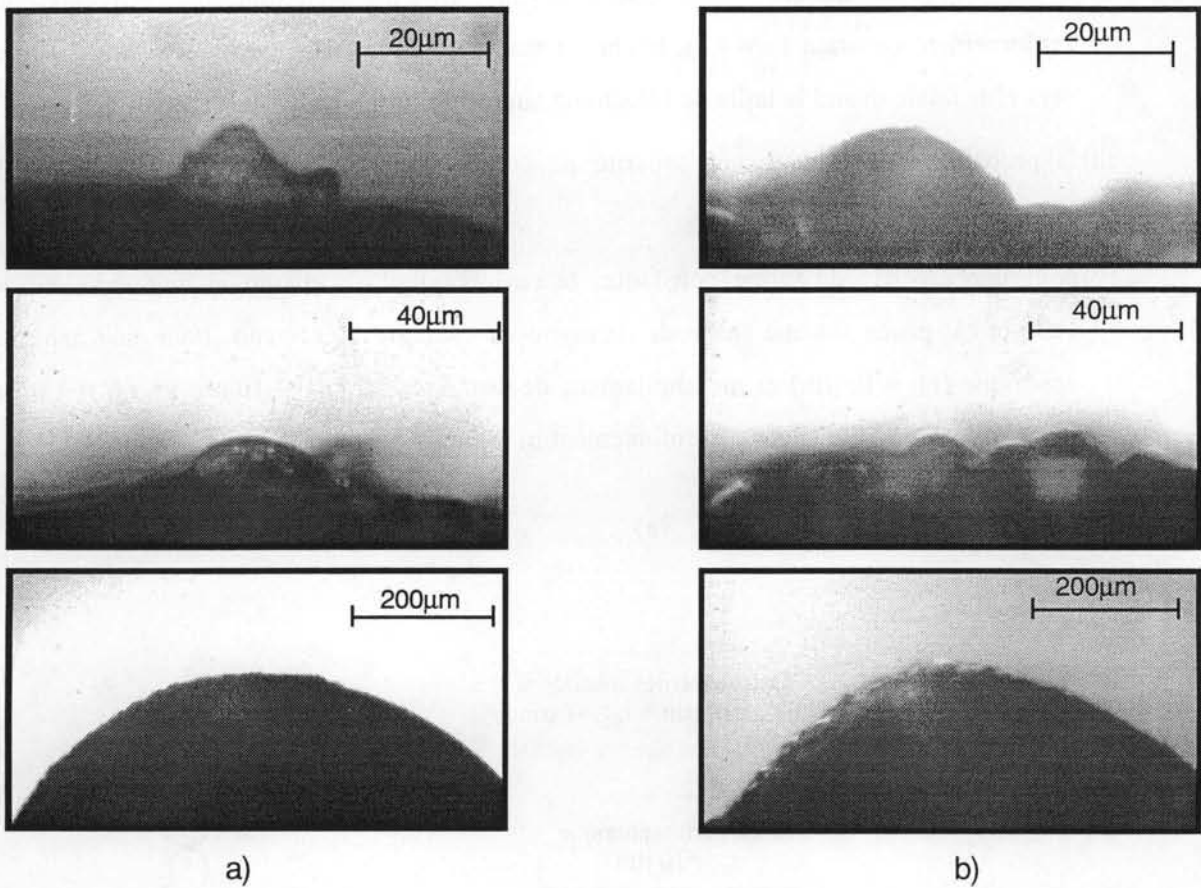


Figure 4.42: Aspérités observées à la surface de la pointe en acier de $r_p = 0,5 \text{ mm}$ a) avant et b) après les expériences.

Dans nos expériences le champ de génération diminue environ d'une décade entre $r_p = 10 \mu\text{m}$ et $r_p = 10 \text{ mm}$ (figure 4.19). Ainsi, un empilement de deux sphères de rayon $r_{01} = 10 \mu\text{m}$ et $r_{02} = 1 \mu\text{m}$ posé sur la tige de $r_p = 10 \text{ mm}$ provoquera une amplification $m = 16$ qui peut expliquer l'écart observé.

En plus de cet effet élémentaire, la décroissance continue de E_g sur une large gamme de r_p (figure 4.19) résulte probablement de la combinaison complexe de différents facteurs :

- i) d'après les résultats obtenus dans le cyclohexane [DEN87], une aspérité de rayon très faible ($r_p < 0,6 \mu\text{m}$ dans le cyclohexane) ne peut pas provoquer la génération d'un streamer;
- ii) la dimension maximale des aspérités ou des particules présentes sur la surface augmente probablement quand la taille de l'électrode augmente. On peut considérer que sur une pointe de quelques dizaines de μm , la taille des aspérités pourra être de l'ordre de $1 \mu\text{m}$, alors que sur une tige de plusieurs mm, il est possible de trouver des aspérités d'environ

10 μm (voir figure 4.42). La figure 4.41 montre que le champ de génération d'un streamer sur une aspérité de 10 μm sera environ deux fois plus faible que sur celle de 1 μm . Par conséquent, si on considère une aspérité sphérique qui provoque un renforcement constant ($m=4,2$), le champ macroscopique E_{max} pour générer un streamer sera plus faible quand la taille de l'électrode augmente;

iii) la probabilité de trouver une aspérité de grande taille augmente avec la surface de l'électrode;

iv) pour une aspérité de forme constante, le renforcement du champ m augmente quand celle-ci est posée sur une électrode de rayon de courbure plus grand. Pour une aspérité sphérique ($r_{01} = 10 \mu\text{m}$) et un empilement de deux sphères ($r_{01} = 10 \mu\text{m}$ et $r_{02} = 1 \mu\text{m}$), nous voyons que le facteur de renforcement m diminue quand r_p diminue (figure 4.43);

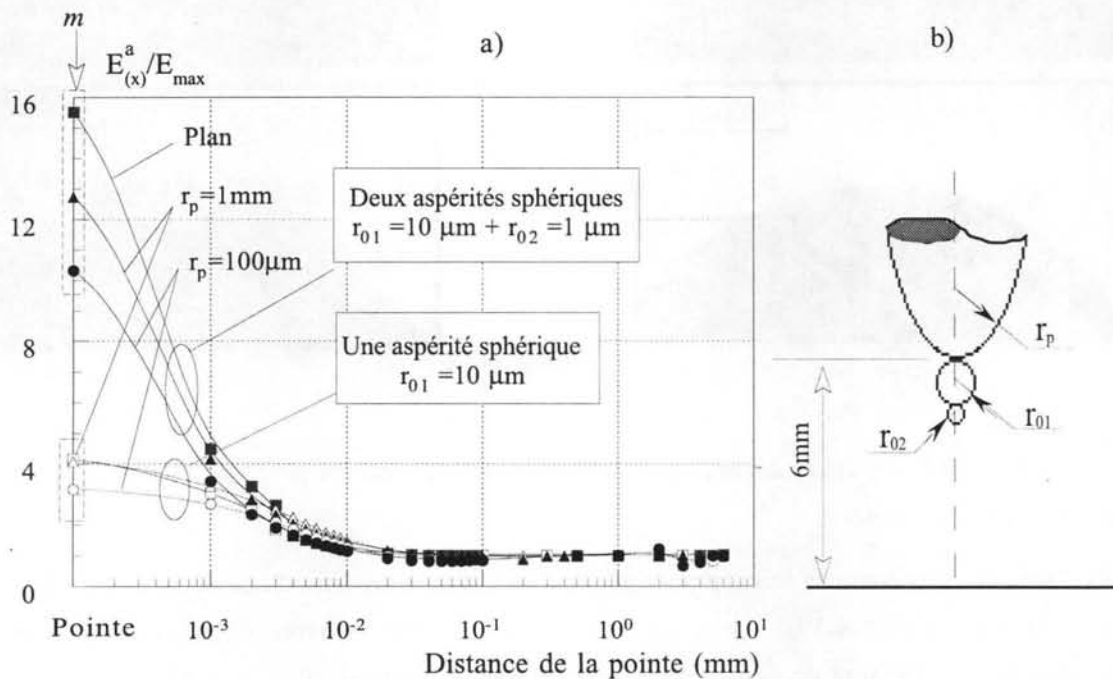


Figure 4.43: a) : Facteur de renforcement du champ m calculé par CSP. b) : aspérités sphériques de rayon $r_{01} = 10 \mu\text{m}$ et $r_{02} = 1 \mu\text{m}$ superposées l'une sur l'autre sur l'électrode de rayon r_p . Distance inter-électrodes $d = 6 \text{ mm}$.

v) devant une aspérité de forme constante, la décroissance du champ en fonction de la distance est moins rapide si r_p est grand (figure 4.44). A une distance de 10 μm de la pointe, le champ varie d'un facteur 3 entre les différents cas considérés sur la figure 4.44. Le champ étant élevé sur une plus grande profondeur, cela favorisera la génération des streamers pour des r_p grands.

Tous ces effets contribuent à favoriser la génération lorsque r_p augmente. Dans la réalité, leurs contributions s'ajoutent, ce qui permet de comprendre qualitativement la décroissance importante de E_g avec r_p (figure 4.19).

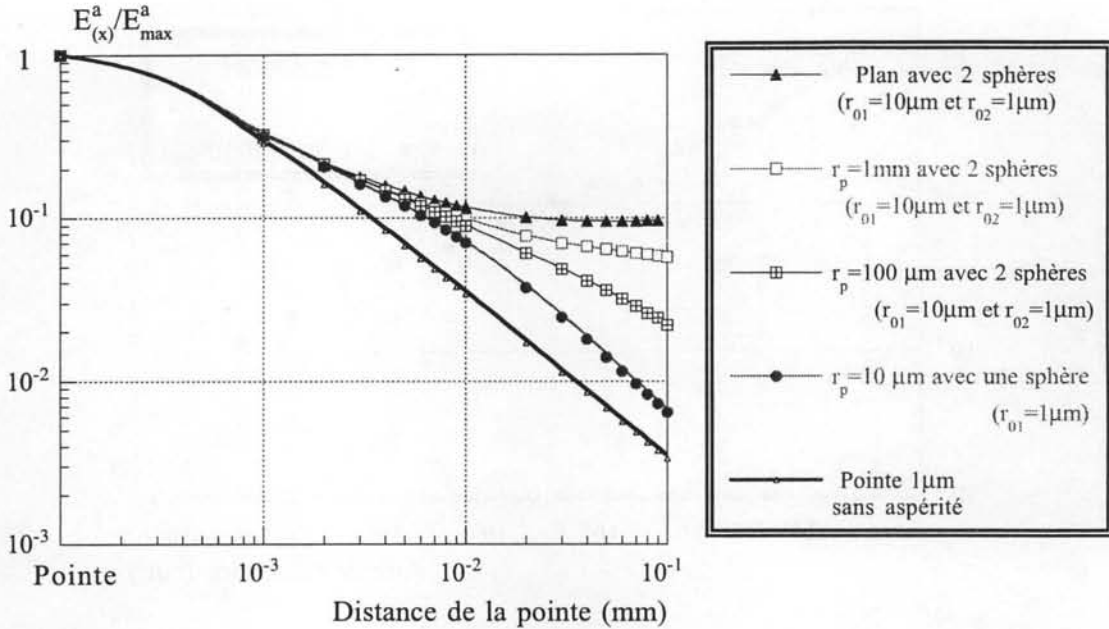


Figure 4.44: Distribution du champ devant l'aspérité en présence d'aspérités sphériques ($r_{01} = 10 \mu\text{m}$ et $r_{02} = 1 \mu\text{m}$) posées sur des électrodes de différents rayons r_p ($d = 6 \text{ mm}$).

4.3.2 EFFET DE SURFACE

Sur la figure 4.45, nous avons tracé le champ de génération en fonction de la surface d'électrode soumise à un champ élevé, estimé par $S = 2\pi r_p^2$. Nous avons ajouté des mesures de tension de claquage réalisées sous impulsions de tension en champ uniforme avec des électrodes de très grandes surfaces [TRIN82]. L'accord entre ces mesures est correct. Nous voyons que la tendance observée avec des tiges jusqu'à $S \approx 1 \text{ cm}^2$ se poursuit de manière identique pour des surfaces supérieures à 1 m^2 .

D'après les résultats de la figure 4.40, nous pouvons estimer la taille des aspérités ou des particules à la surface pour déclencher le claquage. Par exemple, dans nos mesures avec $r_p = 1 \text{ cm}$, $E_g \approx 350 \text{ kV/cm}$. Dans ce cas, un streamer peut être déclenché par une fibre fine (rayon de $1 \mu\text{m}$ et longueur de $50 \mu\text{m}$) ou encore un empilement de deux sphères (par exemple $r_{01} = 10 \mu\text{m}$ et $r_{02} = 1 \mu\text{m}$). Pour de très grandes électrodes ($S > 1 \text{ m}^2$), $E_g \approx 100 \text{ kV/cm}$. Dans ce cas, un simple

empilement de deux sphères n'est pas suffisant, il faut avoir par exemple une fibre allongée (rayon de $1 \mu\text{m}$ et longueur de $250 \mu\text{m}$).

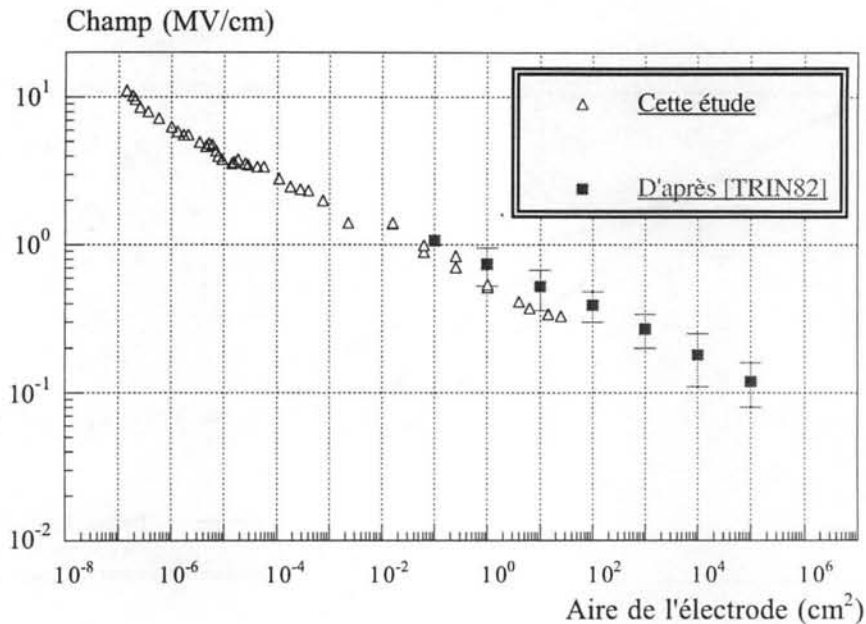


Figure 4.45: Variation du champ de génération et de claquage [TRIN82] en fonction de la surface de l'électrode dans l'huile minérale sous tension impulsionnelle.

4.3.3 COMPARAISON ENTRE LA GENERATION SOUS TENSION IMPULSIONNELLE ET ALTERNATIVE

Sous tension alternative, quand l'effet de l'injection de charge est négligeable avec de grands r_p , un effet comparable de décroissance du champ de génération a été observé (figure 3.10). Les courbes de $E_g(r_p)$ deviennent parallèles à la courbe sous impulsions de tension mais les valeurs sont plus faibles, et dépendent de la fréquence d'apparition.

Sous tension impulsionnelle, les streamers sont générés avec un certain retard t_i par rapport à l'application de la tension (figure 4.14). Le temps de retard à la génération est mesurable sous créneaux de tension pour des électrodes de grand r_p (quelques centaines de μm). Il décroît lorsque la tension appliquée augmente. Sous tension alternative, un effet comparable a été observé : la fréquence d'apparition des streamers augmente exponentiellement avec la tension. Nous pouvons essayer de relier la génération des streamers sous les deux formes de tensions en traçant le retard à la génération t_i en fonction du champ si on considère que sous tension alternative les streamers

d'une polarité donnée apparaissent avec un retard égal au temps moyen entre deux décharges successives ($t_i = 1/2F$). Ces résultats sont présentés sur la figure 4.46.

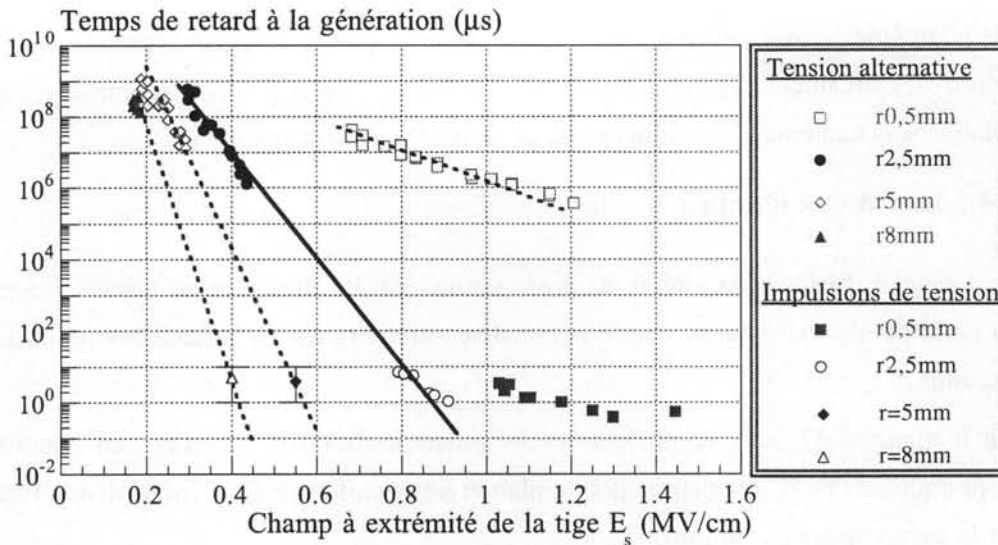


Figure 4.46: Temps de retard à l'apparition des streamers positifs en fonction du champ sous tension alternative ($d = 40$ cm) et sous créneaux de tension ($d = 2$ mm).

Pour $r_p = 2,5$ mm, les résultats semblent en continuité. Pour $r_p = 5$ et 8 mm, le temps de retard t_i n'a pas été mesuré, mais si on considère un temps t_i entre 1 et 10 μ s pour le champ mesuré, la tendance est identique. Pour les rayons plus faibles (par exemple $r_p = 0,5$ mm), il n'y a pas de continuité entre tensions impulsionnelle et alternative, ce qui est explicable car le champ sous tension alternative est largement surestimé (influence de l'injection de charge). Il semble donc que l'écart entre les champs de génération sous tension alternative et impulsionnelle peut être expliqué par la décroissance exponentielle du temps de retard à l'apparition quand le champ augmente.

4.4 PROPAGATION DES STREAMERS EN GEOMETRIE SEMI-UNIFORME

En géométrie semi-uniforme, la présence du plan modifie la distribution du champ à l'extrémité de la pointe et influence la génération des streamers. En ce qui concerne la propagation, une étude récemment réalisée au LEMD par Massala et al. [LESA98b, MASS98a] sur les streamers positifs à grande distance a montré une influence remarquable sur la vitesse de propagation. Pour une pointe $r_p = 100$ μ m à une distance $d = 10$ cm avec deux longueurs de la pointe $h = 10$ et 15 mm, il a été établi que la présence du plan augmente considérablement la tension d'accélération V_a des streamers (tension d'apparition du 3^e mode de streamer positif).

La propagation des streamers n'étant pas le sujet essentiel de notre travail, nous l'avons étudiée brièvement dans les deux polarités en géométrie semi-uniforme. Suivant les conditions

expérimentales, la propagation des streamers peut s'interrompre à une certaine distance l_a (longueur d'arrêt). Elle correspond à la distance séparant la pointe de l'extrémité de la branche la plus longue du streamer.

En géométrie semi-uniforme, nous avons observé que la longueur d'arrêt et la vitesse de propagation des streamers dépend de la tension appliquée, de la polarité (comme en géométrie pointe-plan), mais également des dimensions de la pointe (longueur h).

4.4.1 LONGUEUR D'ARRÊT

La longueur d'arrêt et la vitesse de propagation ont été mesurées en faisant varier seule la longueur de la pointe, étant donné que le rayon de courbure r_p n'a en général aucune influence sur la propagation.

Sur la figure 4.47 sont rapportées les longueurs d'arrêt des streamers en fonction de la tension appliquée en deux géométries pointe-plan et semi-uniforme pour une distance fixe entre la pointe et le plan opposé ($L = 6$ mm).

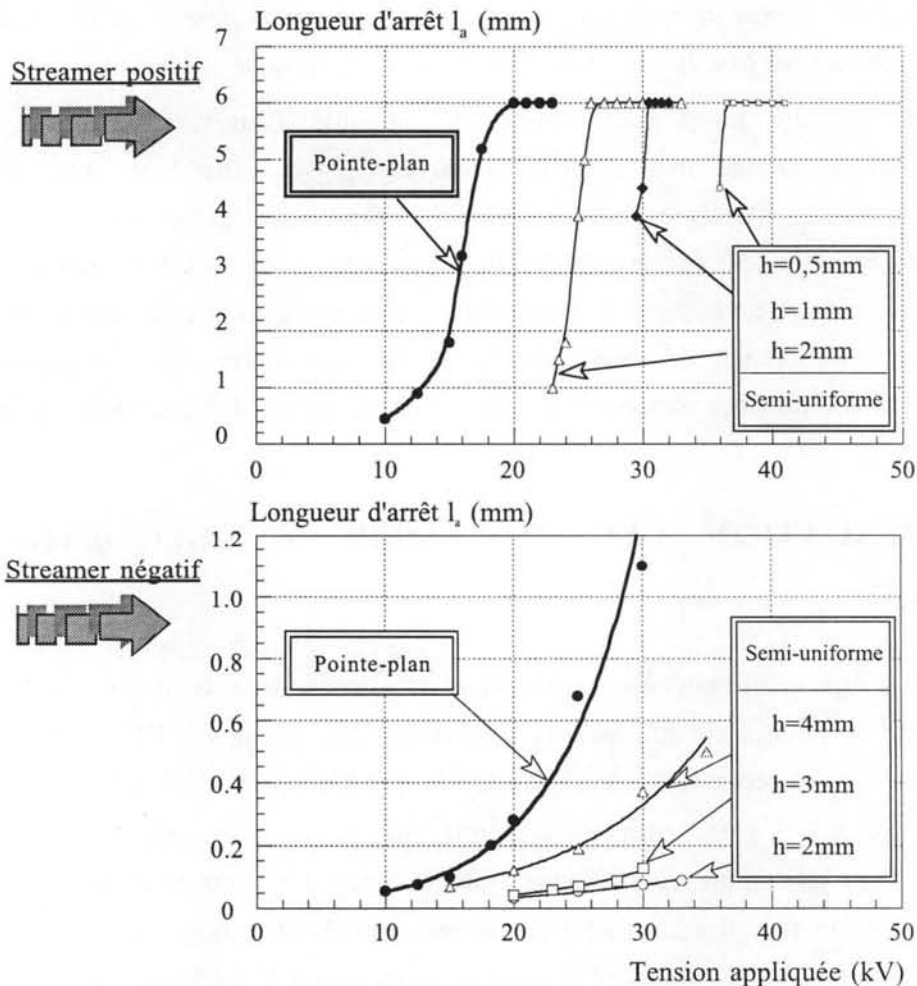


Figure 4.47: Longueur d'arrêt des streamers en fonction de la tension appliquée en géométrie pointe-plan et semi-uniforme ($r_p = 1 \mu\text{m}$, $L = 6$ mm).

a) Polarité positive

Pour des pointes longues ($h \geq 1$ mm), la longueur d'arrêt des streamers croît avec la tension appliquée jusqu'à ce que le streamer vienne au contact avec le plan. Il est impossible de mesurer la longueur d'arrêt des streamers avec des pointes qui dépassent très peu du plan, car la tension de génération est très élevée et tout streamer qui apparaît parcourt la totalité de la distance inter-électrodes et touche le plan. On voit qu'en géométrie semi-uniforme, la tension nécessaire pour que les streamers positifs se propagent complètement est d'autant plus élevée que h est faible.

b) Polarité négative

Dans cette polarité, la longueur d'arrêt des streamers est beaucoup plus faible que celle des streamers positifs dans les mêmes conditions. En géométrie pointe-plan, les streamers positifs touchent le plan pour une tension de 20 kV ($d = 6$ mm), alors que pour une tension de 30 kV, la longueur d'arrêt des streamers négatifs est de 1,1 mm. Comme en polarité positive, on observe que plus la longueur de la pointe est faible, plus les streamers négatifs se propagent difficilement. Pour $h = 2$ mm à 30 kV, la longueur d'arrêt est divisée par 10 (0,1 mm au lieu de 1,1 mm). Pour une pointe identique ($h = 2$ mm) en polarité positive, la tension de propagation augmente de 25% (25 kV au lieu de 20 kV). L'effet du plan sur la propagation est donc nettement plus marqué en polarité négative.

4.4.2 TENSION DE CLAQUAGE

Le claquage se produit lorsque le streamer parcourt l'espace inter-électrodes et touche le plan. En géométrie fortement divergente pointe-plan, la tension de claquage est largement supérieure au seuil de génération. En géométrie semi-uniforme, l'écart entre les tensions de génération et celle de claquage varie selon la longueur de l'électrode d'amorçage. La figure 4.48 montre ces variations pour les streamers positifs filamenteux. Dans ces essais, la distance pointe-plan est la même dans les deux géométries (L fixé à 6 mm). La position du plan situé derrière la pointe est changée pour faire varier la longueur h .

La tension de génération (V_g) est déterminée statistiquement pour une série de 25 essais à chaque niveau de la tension. V_g est la tension nécessaire pour que la probabilité d'apparition des streamers soit égale à 50% (§4.1). Les streamers générés peuvent se propager totalement ou non selon les conditions expérimentales. V_c correspond à la tension pour laquelle 50% des streamers générés touchent le plan dans ces 25 applications de tension.

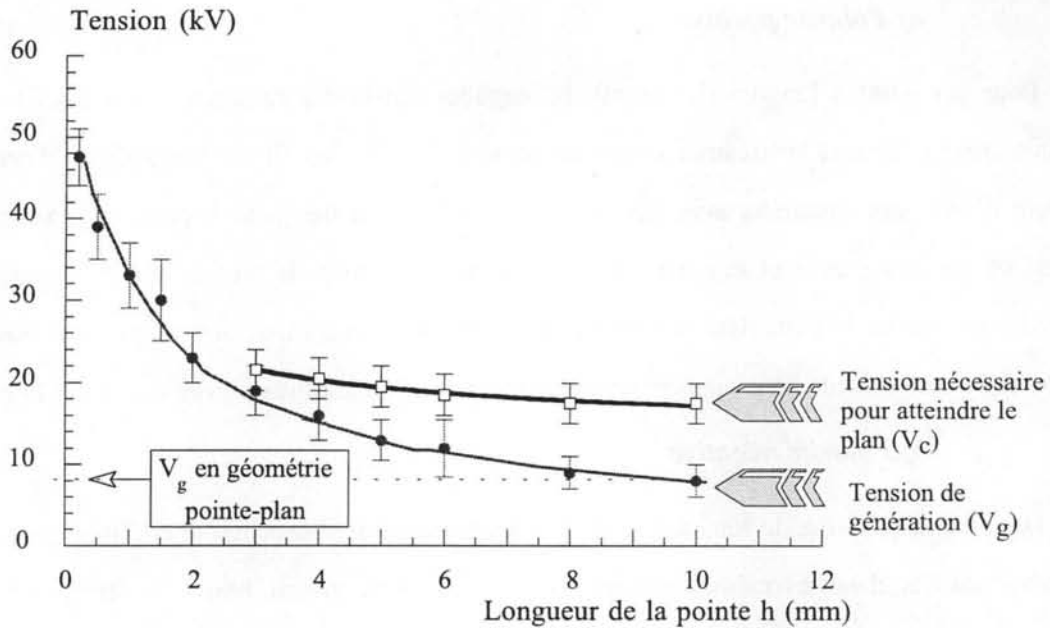


Figure 4.48: Tension d'apparition V_g et tension de propagation totale V_c des streamers positifs filamenteux en fonction de la longueur de la pointe en géométrie semi-uniforme $r_p = 1 \mu\text{m}$; $L = 6 \text{ mm}$.

Les lignes médianes sur la figure 4.48 correspondent aux valeurs moyennes à 50% de probabilité. Les barres d'erreur présentent les valeurs à 0% et 100% de probabilité.

Avec des pointes de longueurs importantes (une dizaine de mm), la tension de génération s'approche de celle en géométrie pointe-plan (8 kV). Il faut appliquer une tension bien supérieure (20 kV) pour que le streamer parcoure tout l'espace inter-électrodes (le claquage est contrôlé par la propagation). L'écart entre V_g et V_c est d'autant plus grand que la longueur de la pointe est importante.

Lorsque la longueur de la pointe diminue, les streamers apparaissent pour des tensions de plus en plus élevées. La diminution de h entraîne également une faible augmentation de la tension de propagation (figure 4.48). Avec des pointes courtes (moins de 0,5 mm), tout streamer qui est généré conduit au claquage. Le claquage est alors contrôlé par la génération des streamers.

4.4.3 VITESSE DE PROPAGATION

Les figures 4.49 et 4.50 montrent la variation de la vitesse de propagation des streamers en géométrie semi-uniforme.

a) Streamer positif

Les streamers positifs filamenteux se propagent à une vitesse quasiment constante avec la tension appliquée (figure 4.49).

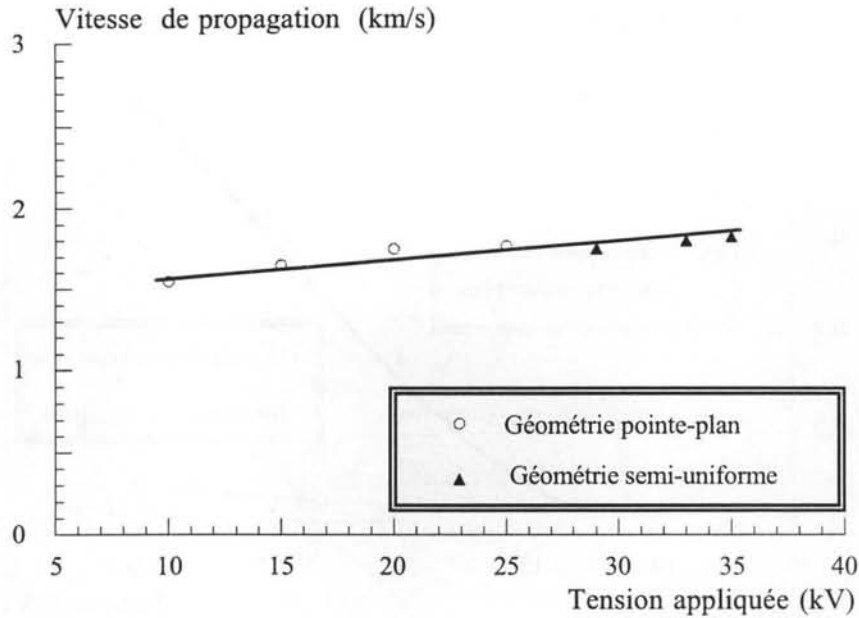


Figure 4.49: Vitesse de propagation des streamers positifs filamentaires en géométrie pointe-plan et semi-uniforme ($r_p = 1 \mu\text{m}$, $L = 6 \text{ mm}$ et $h = 4 \text{ mm}$).

Pour une pointe de $r_p = 1 \mu\text{m}$, $h = 4 \text{ mm}$ et à une distance $L = 6 \text{ mm}$, elle est de l'ordre de $1,8 \text{ kV/cm}$ dans la gamme de tension étudiée, ce qui est très comparable à celle mesurée en géométrie pointe-plan. Ces résultats sont en accord avec les mesures réalisées par Massala et al. [MASS97a] en géométrie semi-uniforme à grande distance.

b) Streamer négatif

La vitesse de propagation des streamers négatifs augmente avec la tension appliquée (figure 4.50) mais différemment selon les configurations d'électrodes. En géométrie pointe-plan, les streamers négatifs se propagent à des vitesses qui augmentent régulièrement avec la tension mais restent subsoniques (moins de 1 km/s).

En géométrie semi-uniforme, la vitesse de propagation pour une tension donnée varie considérablement selon la longueur de la pointe. Plus la pointe est courte, plus la vitesse de propagation est faible. Elle augmente très peu avec la tension pour de faibles longueurs h et n'atteint que quelques dizaines de m/s .

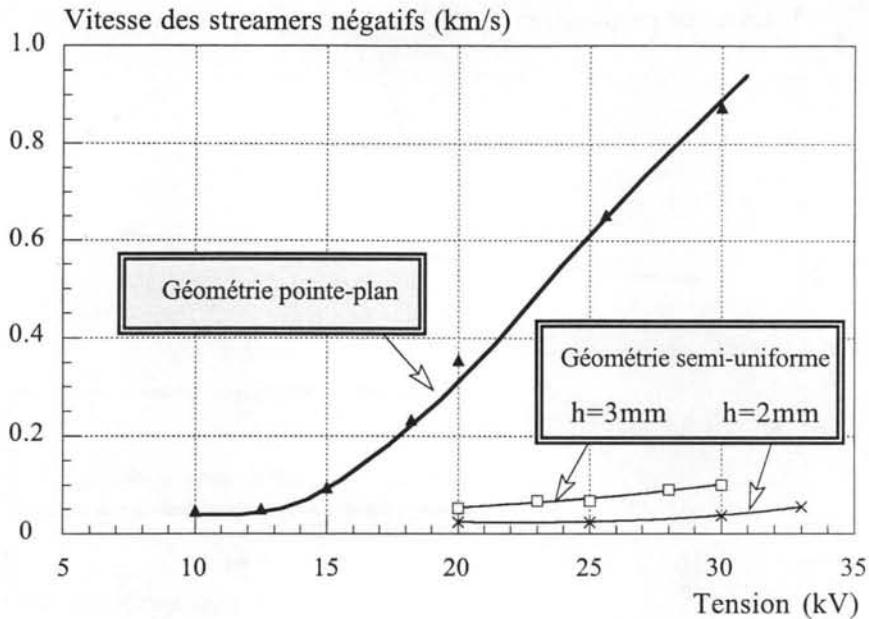


Figure 4.50: Vitesse de propagation des streamers négatifs en géométrie pointe-plan et semi-uniforme ($r_p = 1\mu\text{m}$, $L = 6\text{ mm}$).

4.4.4 DISCUSSION ET CONCLUSIONS SUR LA PROPAGATION DES STREAMERS

Les mesures réalisées en géométrie semi-uniforme montrent que la propagation des streamers s'effectue plus difficilement en comparaison avec la géométrie pointe-plan. Qualitativement, cet effet peut être expliqué en considérant que le champ agissant sur le streamer est réduit par l'effet d'écran du plan situé derrière le streamer.

Cet effet est beaucoup plus important dans le cas des streamers négatifs en buisson que dans le cas des streamers positifs filamenteux.

- Dans le cas des streamers filamenteux, il a été montré [LESA98b, MASS98a] que la ramification du streamer agit comme un mécanisme de régulation qui explique que la vitesse de propagation reste constante sur une large gamme de tension. Lorsque le champ entourant le streamer augmente, celui-ci réagit en créant de nombreuses branches. Ceci contribue à diminuer le champ à l'extrémité de chacune des branches, et à stabiliser la vitesse de propagation. En géométrie semi-uniforme cet effet est nettement observé. En géométrie pointe-plan, le streamer est très ramifié (figure 4.8). En géométrie semi-uniforme, le streamer est moins ramifié (figure 4.21) et seules quelques branches se propagent à une vitesse identique (figure 4.49). On voit donc que ce mécanisme de régulation explique la faible influence de la géométrie et de l'amplitude du champ appliqué sur la propagation des streamers filamenteux.

- Dans le cas des streamers en buisson, cet effet n'existe pas et la propagation est fortement influencée par le champ appliqué. La vitesse de propagation dépend de la tension appliquée et de la géométrie du champ (figure 4.50). Si l'on considère que le streamer se développe

comme une sphère parfaitement conductrice, on peut calculer le champ sur celui-ci au cours de la propagation (figure 4.51).

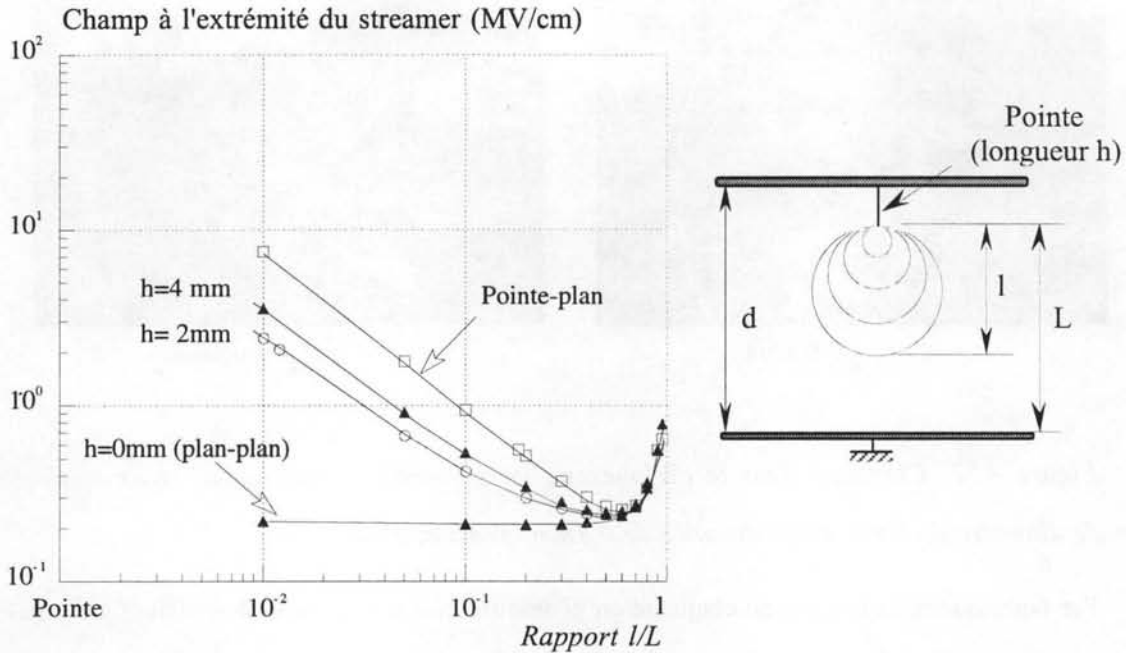


Figure 4.51: Champ à l'extrémité des streamers négatifs au cours de la propagation en géométrie pointe-plan et semi-uniforme ($r_p=1\mu\text{m}$, $L=6\text{ mm}$) à une tension $V=30\text{ kV}$.

Nous voyons qu'en géométrie semi-uniforme, le champ au début de la propagation dépend fortement de la longueur de la pointe h . Pour $l/L=0,01$, le champ est divisé par environ un facteur 40 entre la géométrie pointe-plan et plan-plan. On comprend donc que la propagation de ce type de streamers est pratiquement impossible en géométrie semi-uniforme ou plan-plan (figure 4.47).

Cet effet permet de comprendre le comportement des streamers en géométrie uniforme, observé par Forster et al. [FORS80], et qui n'avait pas reçu jusqu'à présent d'explication satisfaisante. La figure 4.52 montre que des streamers négatifs sont d'abord générés sur la cathode, étant donné que leur tension de génération est plus basse. Malgré le champ moyen élevé ($0,5\text{ MV/cm}$), les streamers négatifs s'arrêtent rapidement (figure 4.52a) à cause de l'effet expliqué précédemment. Lorsque le claquage se produit, celui-ci est dû à un streamer filamentaire issu de l'anode (figure 4.52b).

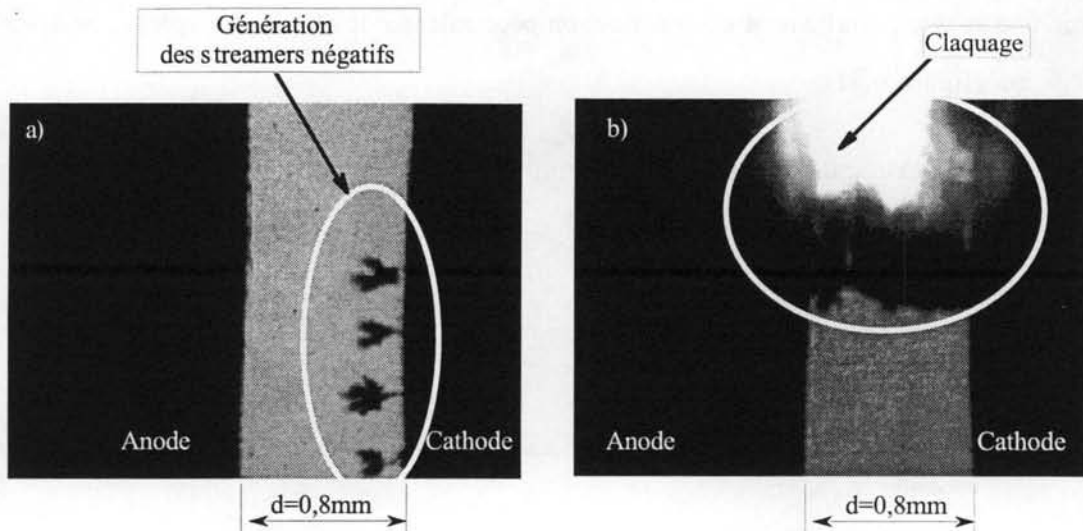


Figure 4.52: Claquage dans le cyclohexane en géométrie composée de deux sphères en acier de diamètre de 8 mm à une distance de 0,8 mm. Tension 40 kV.

Par conséquent, la tension de claquage en géométrie uniforme et sous impulsions de tension, est déterminé par la génération des streamers positifs filamentaires. Cela explique probablement la corrélation observée par Gournay entre la tension de seuil de propagation V_f et la tension de claquage sous impulsions et champ uniforme dans divers liquides [GOUR94a] (voir également tableau 1.1).

Cet effet explique également l'observation importante pour les applications rapportée dans [LESA98a]. En géométrie pointe-plan à grande distance, les streamers positifs et négatifs peuvent se propager. Lorsque le champ est moins divergent, la propagation des streamers négatifs est fortement réduite, et seuls les streamers positifs peuvent conduire au claquage.

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GENERALES

Cette étude de l'influence de divers paramètres (géométrie d'électrodes, forme de tension, polluants) sur la génération des streamers dans l'huile minérale nous permet d'établir certaines relations entre les expériences de laboratoire dans lesquelles les conditions sont simplifiées et bien maîtrisées, et les applications réelles des liquides. Afin de résumer les résultats obtenus, nous traiterons séparément les études sous tension alternative et impulsionnelle.

TENSION ALTERNATIVE

Dans ces expériences, nous avons tenté de maîtriser des paramètres souvent assez mal définis dans les études sur le claquage : différentes géométries du champ, purification de l'huile minérale et addition de polluants de nature connue et en quantité contrôlée. Toutefois, l'étude des phénomènes prédisruptifs sous tension alternative s'est avérée difficile à maîtriser : grande dispersion des mesures, modification du champ par l'injection de charges d'espace, sédimentation des particules métalliques. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence importante de la géométrie et des impuretés sur la génération des streamers et le claquage :

- i) dans l'huile filtrée ou en présence de particules, le champ de génération des streamers diminue quand on augmente le rayon de courbure de l'électrode. Etant donné qu'un effet identique est observé sous impulsions de tension, pour lesquelles les particules contenues dans le volume du liquide n'ont pas d'influence, cet effet est attribué à l'augmentation de la probabilité d'existence de défauts sur l'électrode lorsque sa surface augmente;
- ii) sous champ divergent alternatif, lorsque le champ maximum est supérieur à quelques centaines de kV/cm, l'injection de charge perturbe fortement la distribution du champ;
- iii) en présence de polluants, leurs effets s'additionnent à l'effet de surface. Il apparaît donc dans ce cas une dégradation liée au volume de liquide soumis au champ intense.
 - *avec des particules métalliques*, leur influence sur la fréquence d'apparition des streamers est nettement observée dans les quelques essais réalisés;
 - *en présence de cellulose et d'eau*, la fréquence d'apparition augmente sensiblement. Cet effet est observé dès l'addition d'une quantité faible en cellulose et se sature ensuite rapidement;
 - *teneur en eau* : elle peut jouer un rôle contradictoire selon la géométrie. Sous champ fortement divergent, elle favorise l'injection de charges d'espace et entraîne une diminution de la fréquence d'apparition. Sous champ moins divergent, l'effet de l'injection de charges est moindre. L'eau en présence des particules de cellulose provoque une augmentation de la fréquence d'apparition;
- iv) sous champ peu divergent, les effets observés sur le claquage sont corrélés à ceux observés sur la génération des streamers. Lorsque la surface d'électrode augmente, la dégradation due

à l'effet de surface est dominante et le rôle des polluants est secondaire. Ainsi, il est probable que dans les conditions d'un appareil réel, la cellulose et l'eau n'ont pas d'influence.

TENSION IMPULSIONNELLE

Géométrie pointe-plan ou tige-plan

Avec des rayons de courbure faibles, l'étude réalisée montre que la génération des streamers dans l'huile minérale présente des caractéristiques semblables aux autres hydrocarbures :

Tension positive : existence de deux modes de streamers, d'une tension de seuil de propagation des streamers filamenteux et d'un rayon critique de la pointe.

Tension négative : un seul type de streamer a été observé.

Les mesures réalisées avec une large gamme de rayons de courbure de l'électrode conduisent aux conclusions suivantes :

- i) la tension de génération des streamers varie de manière identique dans les deux polarités, la tension d'apparition des streamers négatifs étant légèrement plus basse;
- ii) le champ de génération diminue lorsqu'on augmente le rayon de l'électrode, suivant une loi $E_g \propto r_p^{-0,35}$.

Géométrie semi-uniforme

Nous avons mis en évidence, par une étude systématique, les faits suivants :

- i) comme en géométrie pointe-plan, la génération des streamers en géométrie semi-uniforme est déterminée par le champ sur l'électrode d'amorçage qui varie selon son rayon de courbure. Par calcul numérique, si on connaît les dimensions de la pointe (longueur et rayon de courbure), on peut calculer le champ moyen ou la tension d'apparition des streamers.
- ii) la propagation des streamers positifs filamenteux est peu modifiée dans cette géométrie. Par contre, les streamers en buisson, générés à proximité d'une électrode plane, ne peuvent pas se propager. Par conséquent, le claquage en géométrie uniforme est déterminé par la génération d'un streamer positif filamentaire.

Ces mesures permettent de comprendre comment une particule ou une aspérité peut déclencher le claquage.

Effet de surface

Différents arguments ont été présentés pour tenter d'expliquer qualitativement la diminution du champ de génération lorsque la surface de l'électrode augmente : le nombre et la taille des aspérités augmentent, et la distribution du champ sur ces aspérités est plus favorable à la génération d'un streamer lorsque le rayon de courbure est grand.

ANNEXE A.1 : CARACTERISTIQUES DE L'HUILE VOLTESSO 35

Voltesso 35 est une huile isolante destinée aux transformateurs électriques, aux disjoncteurs et interrupteurs fonctionnant à l'huile.

Général

Couleur Saybolt	+5
Densité à 16/16°C	34,0°API
Densité spécifique	0.855
Point d'écoulement	-60
Chaleur spécifique	1041,3 J/kg
Conductibilité thermique	0,1367 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Tension interfaciale	4,3 Pa
Solubilité d'air, à 16°C	9,8% par volume

Viscosité

Température (°C)	Viscosité (cSt)
100	2,39
38	9,71
-18	188
-30	515
-35	950
-40	1785
-46	4175
-51	9590
-55	18900

Propriétés électriques

Rigidité diélectrique D877	35 kV
Constante diélectrique	2,2
Facteur de puissance à 25°C, 60Hz	0,03%

Composition

Teneur d'eau	12 ppm
Chlorures & sulfates organiques	Nil
Point d'aniline	92°C
Soufre	0,04% poids
Indice d'acide total	Nil
Corrosion lame de cuivre 5 hrs à 96 °C	1

Niveau de saturation d'eau

Température (°C)	Teneur en eau (ppm)
0 °C	16
5 °C	20
10 °C	27
15°C	36
21°C	46
27°C	58

Analyse par silicagel

Aromatiques	16%
Saturés	84%

Analyse du type de carbone

Atome du carbone aromatique	10%
Atome du carbone naphénique	40%
Atome du carbone paraffinique	50%

Volatilité

Point d'éclair	157°C
Point de feu	176°C
Distillation 10%	304°C

ANNEXE A.2 : COMPTAGE DE PARTICULES

Le comptage des particules a été assuré par les services techniques de la société JST au cours de notre étude.

Huile non filtrée (Comptage le 07/05/96 n°66)

Taille (μm)	essais 1	essais 2	essais 3	essais 4	essais 5	Moyenne (pour 100cm^3)
2-5	8640	8971	10047	9610	8853	92242
5-10	334	369	417	382	354	3712
10-15	79	77	90	65	79	780
15-25	35	33	40	24	21	306
25-50	10	8	6	10	12	92
50-100	1	0	0	0	1	4
100-150	0	0	0	0	0	0
>150	0	0	1	0	0	2

Après la filtration (Comptage le 07/05/96 n°67)

L'huile précédente a été filtrée pendant 30 minutes.

Taille (μm)	essais 1	essais 2	essais 3	essais 4	essais 5	Moyenne (pour 100cm^3)
2-5	192	156	172	148	148	1632
5-10	2	3	3	2	7	34
10-15	1	0	0	1	0	4
15-25	0	1	0	0	0	2
25-50	0	0	0	0	0	0
50-100	0	0	0	0	0	0
100-150	0	0	0	0	0	0
>150	0	0	0	0	0	0

Huile filtrée + 0,1 mg de cellulose par litre (Comptage le 07/02/97 n°9)

Taille (μm)	essais 1	essais 2	essais 3	essais 4	essais 5	Moyenne (pour 100cm^3)
2-5	88	72	92	58	64	748
5-10	4	2	7	2	2	34
10-15	1	4	1	1	1	16
15-25	3	0	0	1	2	12
25-50	2	0	0	0	1	6
50-100	0	0	0	0	0	0
100-150	0	0	0	0	0	0
>150	0	0	0	0	0	0

Huile filtrée + 13 mg de cellulose par litre (Comptage le 07/02/97 n°9)

Taille (µm)	essais 1	essais 2	essais 3	essais 4	essais 5	Moyenne (pour 100cm ³)
2-5	794	816	771	798	770	7898
5-10	21	16	20	23	17	194
10-15	4	7	5	6	5	54
15-25	9	4	5	9	6	66
25-50	5	14	2	11	5	74
50-100	3	3	2	2	1	22
100-150	0	1	0	0	0	2
>150	0	0	0	0	1	2

Huile après la filtration (Comptage le 07/02/97 n°10)

(L'huile était filtrée pendant 1 heure)

Taille (µm)	essais 1	essais 2	essais 3	essais 4	essais 5	Moyenne (pour 100cm ³)
2-5	59	57	65	69	53	606
5-10	7	5	5	3	5	50
10-15	0	0	1	1	1	6
15-25	0	0	0	0	0	0
25-50	0	0	0	0	0	0
50-100	0	0	0	0	0	0
100-150	0	0	0	0	0	0
>150	0	0	0	0	0	0

Huile filtrée + 70 mg de cellulose par litre (Comptage le 100297 n°14)

Taille (µm)	essais 1	essais 2	essais 3	essais 4	essais 5	Moyenne (pour 100cm ³)
2-5	1861	1796	1464	1485	1552	16316
5-10	101	82	72	73	55	706
10-15	8	9	1	7	3	56
15-25	4	4	1	0	0	18
25-50	1	1	1	0	0	6
50-100	0	0	0	0	0	0
100-150	0	0	0	0	0	0
>150	0	0	0	0	0	0

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [ABGR75] F. Abgrall and J. M. Cardon, "Influence of solid impurities on the electric strength of transformer oil" *5th International Conference on Dielectric Liquids*, pp. 79-83, Delft, 1975.
- [BERO86] A. Bérroual and R. Tobazéon, "Prebreakdown phenomena in liquid dielectrics", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-21, n° 4, pp. 613-627, 1986.
- [BERO87] A. Bérroual and R. Tobazéon, "Propagation et génération des streamers dans les diélectriques liquides", *Revue Phys. Appl.*, vol. 22, pp. 1117-1123, 1987.
- [BERO88] A. Bérroual and A. Denat, "Spectral analysis of the light emitted by streamers in liquid dielectrics", *C. R. Acad. Sci, t. 306, Serie II*, pp. 187-192, 1988.
- [BIRL76] S. Birlasekaran and M. Darveniza, "Microdischarges from particles in transformer oil", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-11, n° 4, pp. 162-163, 1976.
- [BIRL93] S. Birlasekaran, "The movement of conducting particles in transformer oil in ac fields", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 28, n° 1, pp. 9-17, 1993.
- [BROO74] A. S. Brookes, "The Weibull distribution : Effect of length and conductor size of test cables", *Electra n° 33*, pp. 49-61, 1974.
- [CARR94] F. Carraz, "Etude de l'influence des particules millimétriques sur la rigidité diélectrique des huiles minérales de transformateur sous champ alternatif uniforme", Diplôme de fin d'étude, LEMD, Grenoble, 1994.
- [CARR95] F. Carraz, P. Rain and R. Tobazéon, "Particle-initiated breakdown in a quasi-uniform field in transformer oil", *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 2, n° 6, pp. 1052-1063, 1995.
- [CEI156] Norme Internationale CEI 156 "Isolants liquides - Détermination de la tension de claquage à fréquence industrielle - Méthode d'essais", Numéro de référence CEI/IEC 156, 1995.
- [CHAD65] W. G. Chadband and G. T. Wright, "A pre-breakdown phenomenon in the liquid dielectric hexane", *Brit. J. Appl. Phys.*, vol. 16, pp. 305-313, 1965.
- [CHAD80] W. G. Chadband, "On variation in the propagation of positive discharges between transformer oil and silicone fluids", *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 13, pp. 1299-1307, 1980.
- [CHAD88] W. G. Chadband, "The ubiquitous positive streamer", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 23, n° 4, pp. 247-255, 1988.
- [CHAT66] (66) P. A. Chatterton, "A theoretical study of field emission initiated vacuum breakdown" *Proc. Phys. Soc. London*, 88, pp. 231-235, 1966.
- [COEL71] R. Coelho and J. Debeau, "Properties of the tip-plane configuration", *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 4, pp. 1266-1280, 1971.

- [CROW54] R. W. Crowe, A. H. Sharbaugh and J. K. Bragg, "Electric strength and molecular structure of saturated hydrocarbon liquids", *J. Appl. Phys.* vol. 25, n° 12, pp. 1480-1484, 1954.
- [DAKI69] T. W. Dakin and J. Hughes, "The behavior of individual conducting particles in electric fields", *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 68-72, Washington DC, 1969.
- [DENA87] A. Denat, J. P. Gosse, B. Gosse, "Conduction du cyclohexane très pur en géométrie pointe-plan", *Revue Phys. Appl.*, vol. 22, pp. 1103-1111, 1987.
- [DENA88] A. Denat, J. P. Gosse and B. Gosse, "Electrical conduction of purified cyclohexane in a divergent electric field", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-23, n° 4, pp. 545-553, 1988.
- [DENA98] A. Denat, N. Bonifaci and M. Nur, "Spectral analysis of the light emitted by streamers in hydrocarbon liquids", *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 5, n° 3, pp. 382-387, 1998.
- [DEVI76] J. C. Devins, S. J. Rzad and R. J. Schwabe, "Prebreakdown phenomena in liquids: electronic processes", *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 9, pp. L87-L91, 1976.
- [DEVI77] J. C. Devins, S. J. Rzad and R. J. Schwabe, "Prebreakdown phenomena in sphere-sphere electrode configurations in dielectric liquids", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 31, n° 5, pp. 313-314, 1977.
- [DEVI81] J. C. Devins, S. J. Rzad and R. J. Schwabe, "Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids", *J. Appl. Phys.*, vol. 52(7), pp. 4531-4545, 1981.
- [DOTO78] K. Dotoku, H. Yamada, S. Sakamoto, S. Noda and H. Yoshida, "Field emission in to non-polar organic liquid", *J. Chem. Phys.*, vol. 69, pp. 1121-1125, 1978.
- [ENDI57] H. S. Endicott and K. H. Weber, "Electrode area effect and for the impulse breakdown of transformer oil", *AIEE Trans.*, pp. 393-398, 1957.
- [FARA61] B. Farazmand, "Study of electrical breakdown of liquid dielectrics using Schlieren optical technique", *Brit. J. Appl. Phys.*, vol. 12, pp. 251-254, 1961.
- [FELI66] N. Félici, "Force et charges de petits objets en contact avec une électrode affectée d'un champ électrique", *Revue Générale de l'Electricité*, tom. 75, n° 10, pp. 1145-1160, 1966.
- [FITZ90] G. J. FitzPatrick, P. J. McKenny and E. O. Forster, "The effect of pressure on streamer inception and propagation in liquid hydrocarbons", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 25, n° , pp. 672-682, 1990.
- [FLES81] J. Fleszynski, B. Lutynski and A. Zelek, "Influence of the electrode paper coating on electric strength of transformer oil", *7th International Conference on Dielectric Liquids*, pp. 465-469, Berlin 1981.

- [FORS80] E. O. Forster et P. P. Wong, "The dynamics of electrical breakdown in liquid hydrocarbon. V : light emission processes", *International Symposium. on Electrical Insulation*, pp. 222-224., Boston, 1980.
- [GALL75] T. J. Gallagher, "Simple dielectric liquids", Oxford University Press, London, UK, 1975.
- [GOLD82] M. Goldman and R. S. Sigmond, "Corona and insulation", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-17, pp. 90-115, 1982.
- [GOOD31] B. L. Goodlet, F. S. Edwards and F. R. Perry, "Dielectric phenomena at high voltage", *J. IEE*, vol. 69, pp. 695-738, 1931.
- [GOSH95] H. Goshima, N. Hayakawa, M. Hikita, H. Okubo and K. Uchida, "Weibull statistic analysis of area and volume effects on the breakdown strength in liquid nitrogen", *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 2, n° 3, pp. 385-393, 1995.
- [GOSW72] B. M. Goswami, L. Angerer and B. W. Ward, "The behavior of impurity particles in transformer oil at variable frequencies" *8th International Conference on Dielectric Liquids*, pp. 218-223, pp. 218-223, Dublin, 1972.
- [GOUR93] P. Gournay and 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.
- [GOUR94a] P. Gournay, "Génération et propagation des streamers positifs dans quelques hydrocarbures", Thèse doctorale de l'INPG, Grenoble, 1994.
- [GOUR94b] P. Gournay and O. Lesaint, "On the gaseous of positive filamentary streamers in hydrocarbon liquids. II :propagation, growth and collapse of gaseous filaments in pentane", *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 27, pp. 2117-2127, 1994.
- [HAID90] M. Haidara, N. Bonifaci and A. Denat, "Corona discharge in liquids hydrocarbons : Influence of pressure", *Proc. Gaseous Diel. VI*, Knoxville, pp. 1971-1977 1990.
- [HAID91] M. Haidara and A. Denat, "Electron multiplication in liquid cyclohexane et propane", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-26, pp. 592-597, 1991.
- [HAKI61] S. S. Hakim and J. B Higham, "A phenomenon in n-hexane prior to its electrical breakdown", *Nature*, vol. 189, pp. 251-254, 1961.
- [HALP69] B. Halpern and R. Gomer, "Field ionization in liquids", *J. Chem. Phys.*, vol. 51, n° 3, pp. 1048-1057, 1969.
- [HARR75] R. T.Harrold, "Electric discharges from metallic slivers and wire particles in mineral oil", *Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 541-524, 1975.
- [HEBN88] R. E Hebner, "Measurement of electrical breakdown in liquids", *The Liquid state and its electrical properties*, edited by E. E. Kunhardt, L. G. Christophorou and L. H. Luessen, Plenum Press, pp. 519-537, New York, 1988.

- [HIP37] A. Von Hippel, "Electrical breakdown of solid and liquid isolators", *J. Appl. Phys.*, vol. 8, pp. 815-83, 1937.
- [IREQ95] Rapport de synthèse "Etude des mécanismes de claquage des grands volumes d'huile", LEMD/IREQ/JST, Rédacteur O. Lesaint et A. Saker, 1995.
- [JUNG97] M. Jung, "Influence of the liquid nature and additives upon streamer propagation in insulating liquids", Diplôme de fin d'étude, LEMD, Grenoble, 1997.
- [KAKO86] Y. Kako, E. Takahashi, H. Okubu, A. Kishi et T. Okamoto, "Influence de particules de faible dimension sur la rigidité diélectrique de l'huile isolante", *CIGRE*, 15-03, pp. 1-10, 1986.
- [KATT89] R. Kattan, A. Denat and O. Lesaint, "Generation, growth, and collapse of vapor bubbles in hydrocarbon liquids under a high divergent electrical field", *J. Appl. Phys.*, vol. 66(9), pp. 4062-4066, 1989.
- [KATT91a] R. Kattan, A. Denat and N. Bonifaci, "Formation of vapor bubbles in non-polar liquids initiated by current pulses", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 26 n° 4, pp. 656-662, 1991.
- [KATT91b] R. Kattan, N. Bonifaci et A. Denat, "Etude de la génération de bulles dans les hydrocarbures liquides générées par l'impulsion de Trichel", *J. Phys. III, France 1*, pp. 1209-1216, 1991.
- [KAWA72] Y. Kawaguchi, H. Murata and M. Ikada, "Breakdown of transformer oil", *IEEE Trans. on Power App. and Syst.*, vol. PAS-91, pp. 9-23, 72.
- [KELL81a] E. F. Kelly and Hebner, "Prebreakdown phenomena between sphere-sphere electrode in transformer oil", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 38 (4), pp. 231-233, 1981.
- [KELL81b] E. F. Kelley and R. E. Hebner, "The electric field distribution associated with prebreakdown phenomena in nitrobenzene", *J. Appl. Phys.*, vol. 52(1), pp. 191-195, 1981.
- [KOME45] V. S. Komel'kov, "Mechanism of dielectric breakdown of liquids", *Comptes rendus (Doklady), l'Academie des Sciences de l'URSS*, vol. 48, n° 4, pp. 268-272, 1945.
- [LESA87] O. Lesaint, "Claquage et préclaquage dans l'huile minérale sous tension alternative", Thèse doctorale de l'INPG, Grenoble, 1987.
- [LESA88] O. Lesaint and R. Tobazéon "Streamer generation and propagation in transformer oil under ac divergent field conditions", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 23, n° 6, pp. 941-954, 1988.
- [LESA91] O. Lesaint, P. Gournay and R. Tobazéon, "Investigation of transient currents associated with streamer propagation in dielectric liquids", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 26, n° 4, pp. 699-707, 1991.
- [LESA94a] O. Lesaint and P. Gournay, "On the gaseous nature of positive filamentary streamer in hydrocarbon liquids. I : influence of the hydrostatic pressure on the propagation", *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 27 pp. 2111-2116, 1994.

- [LESA94b] O. Lesaint and P. Gournay, "Initiation and propagation threshold of positive prebreakdown phenomena in hydrocarbon liquids", *IEEE Trans. on Dielec. and Elec. Insul.*, vol. 1 n° 4, pp.702-708, 1994.
- [LESA96] O. Lesaint, "Propagation of positive discharges in long liquid gaps", *12th International Conference on Dielectric Liquids*, pp. 161-166, Roma, 1996.
- [LESA98a] O. Lesaint, A. Saker, P. Gournay, R. Tobazéon, J. Aubin and M. Mailhot, "Streamer propagation and breakdown under ac voltage in very large oil gaps", *IEEE Trans. on Dielec. and Elec. Insul.*, vol. 5 n° 3, pp. 351-359, 1998.
- [LESA98b] O. Lesaint and G. Massala, "Positive streamer propagation in large oil gaps : Experimental characterization of propagation mode", *IEEE Trans. on Dielec. and Elec. Insul.*, vol. 5, n° 3, pp. 360-370, 1998.
- [LEVI93] P. L. Levin, A. J. Hansen, D. Beatovic, H. Gan and J. H. Petrangelo, "A unified boundary-element finite-element package", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 28, n° 2, pp. 161-167, 1993.
- [LEWI56] T. J. Lewis, "Mechanism of electrical breakdown in saturated hydrocarbon liquids", *J. Appl. Phys.*, vol. 27, pp. 645, 1956.
- [LIAO53] T. W. Liao and J. G. Anderson, "Propagation mechanism of impulse corona and breakdown in oil", *Trans. AIEE*, vol. 72, pt. I, pp. 641-648, 1953.
- [LINH94] D. Linhjell, L. Lundgaard and G. Berg, "Streamer propagation under impulse voltage in long point-plane oil gaps", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 1, pp. 447-458, 1994.
- [LUND95] L. E. Lundgaard and O. Lesaint, "Discharges in liquids in point-plane gaps under ac and impulse stress", *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 596-599, 1995.
- [MASS95] G. Massala, A Saker and O. Lesaint "Study of streamer propagation in mineral oil in overvoltage gaps under impulse voltage", *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 592-595, 1995.
- [MASS97a] G. Massala and O. Lesaint, "Streamer propagation and breakdown in transformer oil under overvoltage in semi-uniform gaps", *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 676-679, Minneapolis, USA, 1997.
- [MASS97b] G. Massala, "Propagation et propriétés électriques des streamers positifs à grande distance dans l'huile minérale sous très haute tension impulsionnelle", Thèse doctorale de l'INPG, Grenoble, 1997.
- [MASS98] G. Massala and O. Lesaint, "Positive streamer propagation in large oil gaps : Electrical properties of streamers", *IEEE Trans. on Dielec. and Elec. Insul.*, vol. 5, n° 3, pp. 371-382, 1998.
- [MATH78] K. N. Mathes and J. M. Atkins, "Influence of particles on partial discharges and breakdown in oil", *International Symposium. on Electrical. Insulation*, pp. 226-231, Philadelphie, 1978.

- [MAZU87] B. Mazurek and J. D. Cross, "An energy explanation of the area effect in electrical breakdown in vacuum", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-22, n° 3, pp. 341-346, 1987.
- [McKE84] P. J. McKenny and P. B. McGrath, "Anomalous positive point prebreakdown behavior in dielectric liquids", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-19, n° 2, pp. 93-100, 1984.
- [MILL67] H. C. Miller, "Change in field intensification factor β of an electrode projection (whisker) at short gap lengths", *J. Appl. Phys.*, vol. 38, n° 11, pp. 4501-4504, 1967.
- [MINE82] K. Miners, "Particle et moisture effect on dielectric strength of transformer oil using VDE electrodes", *IEEE Trans. on Power App. and Syst.*, vol. PAS-101, n° 3, pp. 751-756, 1992.
- [MORI72] E. Morikawa, "Optical observation of prebreakdown phenomena in dielectric oil", *Elec. Eng. in Japan*, vol. 92, n° 1, pp. 11-17, 1972.
- [MOSH83] W. Mosh, W. Exner, J. Speck and W. Houschild, "Computation of the disruptive alternating voltage of SF6 insulation with consideration of the magnification law", *Electric*, vol. 37, pp. 176-179, 1983.
- [NELS71] J. K. Nelson, B. Salvage and W. A. Sharpley, "Electric strength of transformer oil for large electrode areas", *Proc. IEE*, vol. 118, n° 2, pp. 388-393, 1971.
- [NELS89] J. K. Nelson, "An assessment of the physical basis for the application of design criteria for dielectric structures", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 24, n° 5, pp. 835-847, 1989.
- [OOME83] T. V. Oomen and E. M. Petrie, "Particle contamination levels in oil-filled large power transformers", *IEEE Trans. on Power App. and Syst.* vol. PAS-102, n° 5, pp. 1459-1465, 1983.
- [PALM69] S. Palmer and W. A. Sharpley, "Electric strength of transformer insulation", *Pro. IEE.*, vol. 116, n° 12, pp. 2029-2037, 1969.
- [RAIN91] P. Rain, C. Boisdon, O. Lesaint and R. Tobazéon, "Behavior of streamer under divergent ac fields in transformer oils at large gaps", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 26, n° 4, pp. 715-724, 1991.
- [RAIN92] P. Rain and R. Tobazéon, "Behaviour of free conducting particle and their role on breakdown in oil under ac and dc voltages", *6th International Conference on Dielectric Material and Measurement Application*, pp. 96-99, 1992.
- [RAIN94] P. Rain and O. Lesaint, "Prebreakdown phenomena in mineral oil under step and ac voltage in large-gap divergent fields", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 1, n° 4, pp. 692-701, 1994.
- [ROAC80] J. P. Roach, M. Rosado and H. F. Ivey, "Liquid and particle motion in transformer oil under 60 Hz stress", *International Symposium. on Electrical. Insulation*, Boston, pp. 234-238, 1980.

- [RZAD79] S. J. Rzad, J. C. Devins and R. J. Schwabe, "Transient behavior in transformer oils : prebreakdown and breakdown phenomena", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-14, n° 6, pp. 289-296, 1979.
- [RZAD83] S. J. Rzad, J. C. Devins and R. J. Schwabe, "The influence of a dc bias on streamer produced by step voltages in transformer oil and over solid-liquid interfaces", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-18, n° 1, pp. 1-10, 1983.
- [SAKA80] S. Sakamoto et H. Yamada, "Optical study of conduction and breakdown in dielectric liquids", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-15, n° 3, pp. 171-178, 1980.
- [SCHM84] W. F. Schmidt, "Electronic conduction processes in dielectric liquids", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-19, n° 5, pp. 389-418, 1984.
- [SHAR78] A. H. Sharbaugh, J. C. Devins and S. J. Rzad, "Progress in the field of electric breakdown in dielectric liquids", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-13, n° 4, pp. 249-276, 1978.
- [SIBI74] P. Sibillot and R. Coelho, "Prebreakdown events in liquid nitrogen", *J. de Phys.*, vol. 35, pp. 141-148, 1974.
- [SIMO70] Simo, "Large scale dielectric test of transformer oil with uniform field electrode area", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-5, n° 4, pp. 121-126, 1970.
- [STEL66] I. S. Stekol'nikov and V. Ya. Ushakov, "Discharge phenomena in liquids", *Soviet Phys.-Tech. Phys.*, vol. 10, n° 9, pp. 1307-1313, 1966.
- [STRI90] K. L. Striclett, E. F. Kelley, H. Yamashita, C. Fenimore, M. O. Pace, T. V. Blalock, A. L. Winterberg and I. Alexeff, "Observation of partial discharge in hexane under high magnification", *10th International Conference on Dielectric Liquids*, pp. 381-386, Grenoble, 1990.
- [SUEH96] J. Suehiro, K. Ohno, T. Takahashi, M. Miyama and H. Hara, "Size effect and statistic characteristics of dc and pulsed breakdown of liquid helium", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 3, pp. 507-514, 1996.
- [THOM73] W. R. L. Thomas, "An ultra-high speed laser Schlieren technique for studying of electrical breakdown in dielectric liquids", *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 130-136, Washington DC, 1973.
- [TOBA96a] R. Tobazéon, "Charges and discharges of conducting particles in a plane oil gap subjected to a dc voltage", *12th International Conference on Dielectric Liquids*, pp. 309-312, Rome, 1996.
- [TOBA96b] R. Tobazéon, "Electrohydrodynamic behaviour of single spherical or cylindrical conducting particles in an insulating liquid subjected to a uniform dc field", *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 29, pp. 2595-2608, 1996.
- [TOBA97] R. Tobazéon, "Préclaquage et claquage des liquides diélectriques", *Technique de l'Ingénieur*, D2 450, 1997.

- [TORS95] Yu. V. Torshin, "On existence of the leader discharge in mineral oil", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 2, n° 1, pp. 167-178, 1995.
- [TOYA81] H. Toya, N. Ueno, T. Okada, and Y. Murai, "Statistical property of breakdown between metal electrode in vacuum", *IEEE Trans. on Power App. and Syst.*, vol. PAS-100, n° 4, pp. 1932-1939, 1981.
- [TRIN82] N. Giao Trinh, C. Vincent and J. Régis, "Statistical dielectric degradation of large-volume oil-insulation", *IEEE Trans. on Power App. and Syst.*, vol. PAS-101, n° 10, pp. 3712-3721, 1982.
- [USHA66] V. Ya. Ushakov, "Development of a discharge in a liquid with ramp function voltage pulses", *Soviet Phys. -Tech. Phys.*, vol. 10, n° 10, pp. 1420-1423, 1966.
- [VIBR64] G. E. Vibrans, "Vacuum voltage breakdown as a thermal instability of the emitting protrusion", *J. Appl. Phys.*, vol. 35, n° 10, pp. 2855-2857, 1964.
- [WATS85] P. K. Watson, "Electrostatic and hydrodynamic effects in the electrical breakdown of liquid dielectrics", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-20, pp. 395-399, 1985.
- [WATS90] P. K. Watson, "The role of electrostatic and hydrodynamic forces in the electrical breakdown in liquid dielectrics", *10th International Conference on Dielectric Liquids*, pp. 22-28, 1990.
- [WATS93] P. K. Watson, T. Sufian, W. G. Chadband, and H. Yamashita, "The growth and collapse of streamer channels in insulating liquids", *11th International Conference on Dielectric Liquids*, pp. 234-238, 1993.
- [WEBE56] K. H. Weber and H. S. Endicott, "Area effect and its external basis for the electric breakdown of transformer oil", *AIEE Trans.*, pp. 371-381, 1956.
- [WEBE57] K. H. Weber and H. S. Endicott "External area effect for large area electrodes for the electric breakdown of transformer oil", *AIEE Trans.*, vol. 75, pp. 1091-1098, 1957.
- [WILS53] W. R. Wilson, "A fundamental factor controlling the unit dielectric strength of oil", *AIEE Trans.*, pp. 669-674, 1953.
- [WILS55] W. R. Wilson, A. L. Streater and E. J. Tuohy, "Application of volume theory of dielectric strength to oil circuit breakers", *AIEE Trans. on Power App.*, pp. 677-684, 1955.
- [WINT89] A. L. Wintenberg, M. O. Pace, T. V. Blalock and J. V. Foust, "Prebreakdown current pulses in n-hexane and other dielectric fluids", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. 24, pp. 67-74, 1989.
- [WONG82] P. P. Wong and E. O. Forster, "The dynamics of electrical breakdown in liquid hydrocarbons", *IEEE Trans. on Elec. Insul.*, vol. EI-17, n° 3, pp. 203-220, 1982.
- [YAMA77] H. Yamashita, H. Amano and T. Pori, "Optical observation of pre-breakdown and breakdown in transformer oil", *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 10, pp. 1753-1760, 1977.

- [YAMA93] K. Yamazawa, M. Uemura, H. Yamashita and E. O. Forster, "Current pulse measurement system using led in n dielectric liquids under impulse voltage condition", *11th International Conference on Dielectric Liquids*, pp. 352-356, Baden-Dättwil, 1993.
- [YAMA98] H. Yamashita, K. Yamazawa and Y. S. Wang, "The effect of tip curvature on the prebreakdown streamer structure in cyclohexane", *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.*, vol. 5, n° 3, pp. 396-401, 1998.
- [YOUN72] B. Young, "Heavily contaminated transformer oil", *4th International Conference on Dielectric Liquids*, pp. 224-227, Dublin, 1972.

RESUME en français

L'objectif de cette thèse est d'étudier la génération des streamers dans l'huile minérale sous tension impulsionnelle et tension alternative avec des conditions de champ largement variées en présence de certaines pollutions (particules et eau).

Ce travail apporte une meilleure compréhension de la génération des phénomènes précurseurs du claquage. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence importante de la géométrie et des impuretés (particules, eau) sur la génération des streamers. Un effet remarquable de diminution du champ de génération avec l'augmentation du rayon de courbure de l'électrode est observé. Cette diminution est l'origine de l'effet de surface généralement observé sous crêteaux de tension et sous tension alternative dans l'huile très bien filtrée. Une dégradation supplémentaire existe lorsque l'huile est polluée et soumise à la tension alternative.

L'étude réalisée en géométrie semi-uniforme (plan-plan avec une électrode d'amorçage) permet de simuler les conditions de génération et de propagation des streamers provoqués par des particules ou des aspérités de la surface en géométrie uniforme.

TITRE en anglais

A STUDY OF STREAMER INCEPTION IN TRANSFORMER OIL UNDER AC AND IMPULSE VOLTAGE

RESUME en anglais

The objective of this thesis is to study streamer initiation in mineral oil under step and alternating voltage in various geometry and in the presence of some pollution (particles, water).

This work brings a comprehension of the streamer initiation. The results obtained show the significant influence of the geometry and the impurities (cellulose particles, water) on the streamer initiation. The inception fields remarkably decrease when the electrode radii are increased. This reduction explains the surface effect observed under impulse and ac voltage in very well filtered oil. An additional degradation exists when oil is polluted and subjected to ac voltage.

The study carried out in semi-uniform geometry (between two planes with a triggering point) allows to simulate the conditions of streamer generation and propagation caused by surface irregularities or particles in uniform geometry.

DISCIPLINE

Génie Electrique

MOTS-CLES

Génération des streamers

Préclaquage

Huile minérale