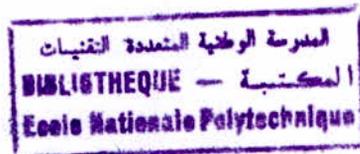


ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



THESE DE DOCTORAT D'ETAT

Présentée par : **Hocine MOULAI**

SUJET

**ETUDE DES COURANTS DE PRECLAQUAGE DANS
LES DIELECTRIQUES LIQUIDES.**

Soutenue le 30 Octobre 2001

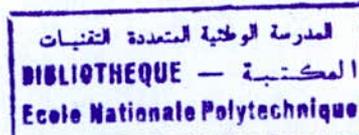
Devant le jury :

Madame	K. ALLIA	Professeur à l'USTHB	Présidente
Messieurs	A. BEROUAL	Professeur à l'E.C.Lyon	Directeur de Thèse
	A. BOUBAKEUR	Professeur à l'E.N.P.	
	A. SOUALMIA	Professeur à l'USTHB	Examineurs
	A. MEKHALDI	Maître de Conférences à l'E.N.P.	

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



THESE DE DOCTORAT D'ETAT

Présentée par : **Hocine MOULAI**

SUJET

**ETUDE DES COURANTS DE PRECLAQUAGE DANS
LES DIELECTRIQUES LIQUIDES.**

Soutenue le 30 Octobre 2001

Devant le jury :

Madame	K. ALLIA	Professeur à l'USTHB	Présidente
Messieurs	A. BEROUAL	Professeur à l'E.C.Lyon	Directeur de Thèse
	A. BOUBAKEUR	Professeur à l'E.N.P.	Examineur
	A. SOUALMIA	Professeur à l'USTHB	Examineur
	A. MEKHALDI	Maître de Conférences à l'E.N.P.	Examineur

REMERCIEMENTS



Le présent travail a été réalisé au laboratoire de haute tension de l'Ecole Centrale de Lyon sous la direction de Monsieur le professeur Abderrahmane BEROUAL, que je tiens à remercier de tout mon cœur pour tout le soutien et l'aide dont je ne me suis jamais senti dépourvu depuis dix sept ans. Sa rigueur, son esprit visionnaire, son humanisme, son sens de la fidélité dans le travail et de l'amitié m'ont permis, au delà du côté scientifique, d'apprendre beaucoup.

Je saisis également cette opportunité pour remercier Messieurs les professeurs Alain NICOLAS, directeur du Centre de Génie Electrique de Lyon, et Philippe AURIOL, Chef du Département Electronique Electrotechnique Automatique de L'Ecole Centrale de Lyon, pour m'avoir accueilli au sein de leur laboratoire.

Mes sincères remerciements et ma reconnaissance vont à l'adresse de Monsieur le Professeur Ahmed BOUBAKEUR, Chef de laboratoire de Haute Tension de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger auprès duquel j'ai toujours trouvé disponibilité, aide et réconfort.

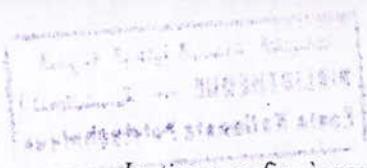
J'adresse mes vifs remerciement à Madame Khedidja ALLIA, professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène d'Alger, pour avoir accepté de juger ce travail et m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Que Monsieur Achour SOUALMIA, professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène d'Alger, trouve ici l'expression de mon estime et mes remerciements pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier Monsieur Abdelouahab MEKHALDI, Maître de Conférences et chef de département d'électrotechnique à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger pour son soutien moral et ses bons conseils le long de l'élaboration du présent travail ainsi que pour avoir accepté de faire partie du jury de soutenance.

Je ne saurais oublier de remercier Messieurs F. Chapuis et C. Joubert, pour leur disponibilité à m'aider et leur gentillesse.

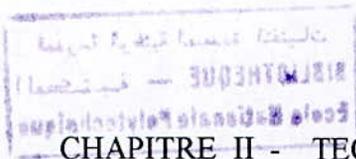
Mes remerciements vont également à l'endroit de mes collègues de l'ITS et du département d'électrotechnique de l'ENP pour leurs encouragements et leur soutien.



Je tiens enfin à remercier mon épouse Leila et mes enfants pour leur patience, leur compréhension et leur soutien dans les moments les plus difficiles.

TABLE DES MATIERES

	Page
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I - ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.	5
Introduction	6
1- Propagation	6
1.1- Processus de formation et nature des streamers.	6
1.2- Vitesse de propagation.	8
1.3- Structure des streamers.	10
1.4- Fréquence d'apparition des streamers.	13
1.5- Courants et émissions lumineuses accompagnant les streamers.	13
2- Influence de certaines propriétés physiques des liquides.	17
2.1- Influence de la viscosité.	17
2.2- Influence de la masse volumique.	17
2.3- Structure du liquide.	18
3- Influence des variables d'état.	18
3.1- Influence de la pression.	18
3.2- Influence de la température.	19
4- Influence du niveau de tension appliqué.	19
5- Influence du rayon de courbure de la pointe.	20
6- Influence des additifs.	21
6.1- Additifs capteurs d'électrons.	21
6.2- Additifs à bas potentiel d'ionisation.	22
7- Analyse spectrale et chromatographique.	22
8- Modèles d'évaluation des vitesses des streamers.	24
8.1- Modèle proposé par Devins, Rzađ et Schwabe.	24
8.2- Modèles proposés par Watson et Watson et al.	25
8.3- Modèle proposé par Felici.	30
8.4- Modèle proposé par Beroual.	33
Conclusion.	39



CHAPITRE II - TECHNIQUE EXPERIMENTALE. 40

- 1- Sources de tension. 41
- 2- Liquides testés. 41
- 3- Cellule d'essai. 41
- 4- Mesure des courants. 44
- 5- Mesure de la charge. 44
- 6- Détection de la lumière. 45
- 7- Calibrage de la lumière. 45

CHAPITRE III - ETUDE SOUS TENSION ALTERNATIVE. 47

- Introduction. 48
- 1- fréquence d'apparition des streamers. 48
- 2- Courants et charges. 51
 - 2.1- Forme des courants et aspect statistique. 51
 - 2.2- Amplitude des courants. 55
 - 2.3- Charges. 59
- 3- Influence du niveau de tension appliqué. 63
- 4- Influence de la distance inter-électrodes (géométrie). 66
- 5- Corrélation courant- lumière. 70
- 6- Influence de la nature du liquide. 72
- 7- Alternance de la tension. 74
- 8- Analyse fréquentielle. 78
- Conclusion. 80

CHAPITRE IV - ETUDE SOUS TENSION CONTINUE. 81

- Introduction. 82
- 1- Fréquence d'apparition des streamers. 82
- 2- Courants et charges. 85

2.1- Courants.	85
2.2- Charges.	88
3- Influence du niveau de tension appliquée.	91
4- Distance inter-électrodes.	91
5- Corrélation courant- lumière.	93
6- Nature du liquide.	96
7- Polarité de la pointe.	96
8- Fréquences des courants et des émissions lumineuses.	97
Conclusion.	100
CHAPITRE V - DISCUSSIONS.	101
Introduction.	102
1- Evaluation de la vitesse par le temps au claquage.	102
2- Corrélation courant- vitesse- champ électrique.	107
3- Modèle de propagation.	112
3.1- Courants et charges.	112
3.2- Vitesse de propagation.	120
3.2.1- Streamer filamentaire.	120
3.2.2- Streamer en buisson.	122
Conclusion.	128
CONCLUSION GENERALE.	129
BIBLIOGRAPHIE.	133

TABLE DES PRINCIPAUX SYMBOLES

<i>Symbole</i>	<i>Unité</i>	<i>définition</i>
v	m/s	Vitesse de propagation
U	V	Niveau de tension appliqué
E	V/m	Intensité du champ électrique
ρ	Kg	Masse volumique
r_p	m	Rayon de courbure de l'électrode pointe
d=L	m	Distance inter électrodes
γ		Coefficient d'ionisation
e	C	Charge de l'électron (=1.602 . 10 ⁻¹⁹ C)
m_e	Kg	Masse de l'électron
h	J.s	Constante de Planck (=6.626 . 10 ⁻³⁴ J.s)
V _{io}	eV	Potentiel d'ionisation
a	m	Distance inter moléculaire
n	1/m ³	Nombre de molécules par unité de volume
c		Concentration des porteurs de charge
ϵ	F/m	Permittivité diélectrique
R _s	m	Rayon d'une cavité gazeuse (modèle de Watson)
P _{es}	Pa	Pression électrostatique
t	s	Temps
L _a	m	Distance entre le centre du streamer sphérique et l'électrode plane
V	m ³	Volume
F _{es}	N	Force électrostatique
F _{in}	N	Force d'inertie
W	J	Energie
x	m	Longueur du streamer
ν	St	Viscosité cinématique
S	m ²	Surface
S _e	m ²	Section
R _e	Ω	Résistance électrique
I	A	Courant
EL	Cd	Emission lumineuse (intensité)
q	C/m ³	Densité de charge volumique
K	m ² /V.s	Mobilité des électrons
W _e	J	Travail des forces électrostatiques
L'	J	Energie totale de vaporisation et de décomposition
eU _i	J	Energie totale que doit recevoir du champ un électron pour créer une paire électron-ion.
D	C/m ²	Densité de charge surfacique
Q	C	Charge électrique
t _{max}	S	Temps de montée de la composante continue du courant
t _c	S	Temps de retard au claquage.
U _i	V	Tension seuil d'initiation
T _t	S	Durée totale du courant
C	F	Capacité
σ	$\Omega^{-1}.m^{-1}$	Conductivité
P _i	W	Puissance.
W _i	J	Energie

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

Il est généralement admis que le claquage d'un isolant liquide est précédé de deux phases : (1) une phase de génération durant laquelle plusieurs mécanismes peuvent évoluer, donnant naissance à une perturbation (de quelques μm de diamètre) dont l'indice de réfraction est différent de celui du liquide. De l'instabilité de l'interface de cette perturbation dépendent les événements ultérieurs ; (2) une phase de propagation correspondant au développement des phénomènes prenant naissance à l'interface de la perturbation. En général ces phénomènes sont appelés streamers "zones ionisées" revêtant la forme d'arborescences. Leur structure dépend du champ local dans le milieu liquide ; ils peuvent être en forme de buisson (sphère, demi-sphère), en forme de parapluie ou encore très filamenteuses. Ils sont caractérisés par plusieurs paramètres : forme et vitesse, courant et charge, et émission lumineuse.

Les phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides ont fait l'objet de nombreux travaux. Ceux-ci ont porté principalement sur la forme et la vitesse des streamers ainsi que sur les paramètres électriques (courants et charges), optiques (émission lumineuse) et acoustique qui les accompagnent.

La forme, la durée et l'amplitude de ces courants (charges) et émissions lumineuses sont d'une grande importance pour la compréhension des processus physico-chimiques impliqués dans la génération et la propagation des streamers.

Plusieurs travaux ont permis d'établir une corrélation entre la forme du streamer, sa vitesse et son mode de propagation (continu ou par sauts), d'une part, et entre sa forme et celle du courant (charge) et de l'émission lumineuse correspondante, d'autre part.

L'effet de la polarité de la tension a été également mis en évidence dans des configurations d'électrodes pointe-plan et pointe-sphère.

Différents auteurs proposent des processus d'émission et d'ionisation de champ suivis par des décharges partielles dans des bulles en expansion engendrant ainsi des impulsions de courant corrélées à une émission lumineuse. Ces impulsions sont apparentées aux impulsions de Trichel observées dans les gaz.

Il ressort des nombreux travaux rapportés dans la littérature que les facteurs essentiels influant sur la forme du streamer, et par conséquent sur la forme du courant et de l'émission lumineuse correspondante, sont la polarité de la tension et la géométrie des électrodes (rayon de courbure et distance inter-électrodes), la nature du liquide, la pression et la température.

Dans ce travail, nous présentons les résultats d'une étude systématique sur les courants (charges) et émissions lumineuses associés à la propagation des streamers positifs et négatifs, dans l'huile minérale de transformateur, le tétraester et le toluène soumis aux tensions alternative et continue.

Le premier chapitre sera consacré à l'analyse des différents résultats essentiels rapportés dans la littérature concernant la propagation des streamers dans divers liquides soumis à un champ électrique très divergent. Les modèles les plus en vue seront également présentés et analysés dans ce chapitre.

Dans le deuxième chapitre, nous décrirons le dispositif expérimental et les techniques utilisées pour enregistrer les résultats présentés dans ce travail.

Le troisième chapitre comprendra une étude systématique sur les courants, charges et émissions lumineuses caractérisant aussi bien les streamers positifs que négatifs, sous tension alternative 50 Hz. L'influence du niveau de tension appliqué et de la distance inter-électrodes sur la forme et l'amplitude de ces caractéristiques sera étudiée et une analyse des fréquences des pics de courant et de lumière sera présentée. Nous étudierons également les variations des fréquences d'apparition de chaque type de streamer et un critère de claquage en fonction de ces fréquences sera dégagé.

Le quatrième chapitre comprendra une étude, similaire à celle effectuée au troisième chapitre, sous tension continue.

Dans le cinquième chapitre, nous discuterons les résultats essentiels obtenus dans les chapitres précédents. Nous présenterons notamment une évaluation de la vitesse par le temps correspondant à la valeur maximale du courant et établirons une corrélation entre courant, vitesse et champ électrique.

Un modèle de propagation des streamers tant négatifs que positifs, basé sur les circuits RC, sera présenté. Il comprendra le calcul du courant, de la charge, de la puissance, de l'énergie et de la vitesse correspondant à ces streamers.

Les différents paramètres influant sur la vitesse du streamer, le courant et charge correspondante ainsi que son mode de propagation, seront discutés.

CHAPITRE 1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse des principaux résultats obtenus par différents auteurs concernant le comportement des streamers dans les diélectriques liquides en fonction de divers paramètres dont le rayon de courbure des électrodes, la tension appliquée (forme, polarité et amplitude), la distance inter-électrodes ainsi que la structure moléculaire des liquides et l'action des additifs. La plupart des résultats ont été obtenus avec une géométrie pointe-plan. Des corrélations entre les différentes caractéristiques des streamers ont été établies. Il s'agit plus particulièrement d'une corrélation entre la forme et la vitesse des streamers, les courants et l'émission lumineuse qui les accompagnent [1].

Il est communément admis qu'il existe deux phases dans les phénomènes de préclaquage des matériaux diélectriques: Une phase d'initiation dont la durée décroît lorsque le champ appliqué augmente et/ou le rayon de l'électrode acérée diminue [1]. Elle est suivie par une phase de propagation menant éventuellement vers un claquage.

Le temps nécessaire à l'apparition de la moindre perturbation au niveau de l'électrode pointe augmente linéairement avec le temps de montée ' t_m ' d'un créneau de tension [1]. La tension d'initiation augmente avec le rayon de courbure de la pointe et/ou la distance inter-électrodes augmente [2].

La tension d'initiation est plus élevée en polarité positive qu'en polarité négative [3,4]. Elle dépend non seulement de la géométrie des électrodes mais également de la structure du liquide[3]; le champ nécessaire à l'apparition des streamers positifs et négatifs est de l'ordre de 2 à 2.5 MV/cm [5].

1- Propagation:

1.1- Processus de formation et nature des streamers :

Il existe trois courants principaux concernant la nature et les processus de formation des streamers.

Le premier est basé sur le modèle présenté par Devins et al. [6] où le streamer est assimilé à une colonne de plasma dont les porteurs de charge sont produits selon un mécanisme similaire à celui proposé par Zener pour les solides (effet Zener). Les électrons passent par effet tunnel de la bande de valence à la bande de conduction sous l'effet du champ.

Le second, basé sur les processus gazeux, a été essentiellement développé par Watson et al. [7]. Ces auteurs considèrent le streamer comme le développement d'une microbulle créée suite à une injection rapide d'énergie conduisant à l'évaporation du liquide et engendrant la force de poussée. L'expansion de la bulle sera limitée par l'inertie du milieu liquide environnant et par le travail dépensé pour vaincre la pression ambiante.

Beroual [8] a montré que les deux mécanismes, électronique et gazeux, n'agissent pas séparément dans la phase de préclaquage. L'influence remarquable de la pression hydrostatique sur l'initiation et la propagation des streamers, et l'analyse chromatographique des liquides testés, montrent que la nature physique des streamers est gazeuse. Par ailleurs, l'influence d'additifs capteurs d'électrons sur les streamers négatifs et à bas potentiel d'ionisation sur les streamers positifs, l'effet de la présence d'halogènes dans la structure moléculaire du liquide sur les streamers négatifs, et l'analyse spectroscopique de la lumière émise par les streamers, indiquent que les processus électroniques sont aussi présents.

Lewis, dans une approche tout à fait originale [9,10], montre théoriquement que la propagation des streamers est due beaucoup plus à un processus mécanique qu'électrique, ayant lieu dans le liquide, ce dernier étant assimilé à une structure solide amorphe. Sous l'effet du champ électrique appliqué, il y a d'abord génération de trous par effet thermique, dans la zone de champ fort, et lorsque la concentration est suffisante, il se produit un phénomène de "cracking" dans le liquide (comme cela est bien connu dans les solides)

donnant ainsi naissance à une zone (colonne) de basse pression se propageant dans le liquide et dans laquelle une émission électronique renforcée par le champ peut avoir lieu; celui-ci sera suivie par un processus de collision et ionisation. L'auteur, suggère un modèle électromécanique pour le préclaquage et claquage dans lequel les décharges électriques jouent un rôle plutôt secondaire. Il ne tient cependant pas compte du mouvement très important du liquide, observé dès application d'une modeste tension.

1.2- Vitesse de propagation :

La vitesse des streamers a été étudiée de manière intense. Elle varie fortement selon la structure du liquide, la polarité de la pointe et la géométrie des électrodes. Une classification des liquides selon leur masses volumiques a été proposée par Sakamoto et Yamada [11]. Le tableau 1 donne les vitesses moyennes des streamers positifs et négatifs déduites à partir du temps de retard au claquage et où les liquides ont été classés selon cinq groupes [11]. Beroual et Tobazéon [1] ont montré que cette classification (en cinq groupes) en fonction des masses volumiques était fautive. Beroual [12] a montré que la structure moléculaire du liquide et plus particulièrement son affinité électronique ainsi que la présence ou non d'halogènes étaient les paramètres décisifs quant à la forme et la vitesse des streamers dans un liquide donné. En effet, la présence d'un seul atome de chlore dans le chlorocyclohexane multipliait la vitesse des streamers négatifs par dix par rapport à celle du cyclohexane.

Selon Lewis [9], la vitesse des streamers dépendrait de la vitesse de création de trous par cassure des molécules du liquide sous l'effet du champ électrique.

La distribution des vitesses passe par un minimum plus ou moins marqué situé approximativement entre le milieu et les 2/3 de l'intervalle inter-électrodes ($d < 5\text{mm}$) quels que soient le liquide et la polarité de la pointe. Ce minimum est d'autant plus marqué que la

tension est augmentée [1]. Pour les distances plus importantes (1.27 à 2.54cm), ce minimum est moins marqué; la vitesse des streamers positifs reste pratiquement constante dans certains hydrocarbures et huiles silicones [6].

Liquides	Vitesse en polarité Positive (km/s)	Vitesse en polarité négative (km /s)	Masse volumique ρ (kg/m ³) (20 à 25°C)
n-pentane	3,6	0,11	626
n-hexane	3,2	0,19	660
n-heptane	3,4	0,22	684
n-octane	3,3	0,13	703
cyclohexane	2,8	0,056	779
Marcol 70	2,4	0,08	-
huile silicone (50cst)	2,7	0,07	-
benzène	1,2	0,12	879
toluène	1,2	0,60	867
dodecylbenzène	2,3	0,081	856
huile de transformateur	2,2	1,1	~900
tétrachlorure de carbone	30	8,4	1596
monochlorobenzène	76	0,45	1107
trichlorobenzène	62	25	1460
Iodobenzène	15	9,1	1832

Tableau 1 : Vitesse moyenne des streamers déduite du retard au claquage en géométrie pointe plan (d'après [11,13,14])

A partir du temps de transit (temps correspondant à la valeur maximale de la composante continue du courant), Harrold [15] a pu estimer la valeur moyenne de la vitesse de propagation des streamers positifs dans différents liquides et gaz. Ceci a été confirmé par A. Beroual [8] en comparant les résultats obtenus par cette méthode avec ceux obtenus par ombroscopie.

La vitesse du streamer est corrélée à sa forme ; plus le streamer est filamentaire, plus sa vitesse est grande. Selon Yamashita *et al*, la vitesse moyenne des streamers positifs filamenteux dans le n-hexane est de l'ordre de 1.1 à 2 km/s alors que celle des streamers positifs buissonneux est de l'ordre de 120 à 270m/s [16]. Les streamers sont d'autant plus rapides qu'ils sont filamenteux.

1.3- Structure des streamers :

La structure des streamers est fonction de la polarité de la pointe, du niveau de tension appliqué et de la géométrie des électrodes (distance et rayon de courbure de la pointe). La figure 1 montre les formes de streamers les plus observées dans le cyclohexane; d'autres formes ont été également observées [5,16,17].

En polarité positive, lorsque la valeur du champ appliqué est modérée ($2\text{MV/cm} < E < 12\text{MV/cm}$), les streamers positifs primaires apparaissent en branches sous forme de "parapluie" [5]. Ils se propagent à une vitesse constante de l'ordre de 2 à 3 km/s.

Aux champs électriques plus élevés, $E > 12\text{MV/cm}$, des streamers de deuxième type sont observés [5]. Ils présentent une structure spatiale assez complexe avec un canal principal illuminé de rayon compris entre 60 et 90 μm à partir duquel dérivent des branches secondaires, également lumineuses, dont les terminaisons sont sous forme de buissons de 0.7 à 1.2mm de rayon. Chaque buisson est constitué de pas moins de 20 ramifications, peu lumineuses et dont le rayon est de l'ordre de 3 à 6 μm [17]. Les valeurs de champ nettement plus élevées engendrent un court streamer primaire suivi par un streamer secondaire puis un tertiaire, ultra rapide (sa vitesse peut dépasser 100km/s [5]) et souvent auto-illuminé, dont la structure est très peu différente de celle des streamers secondaires.

Yamashita et al. [16,18] ont observé dans le cyclohexane sous tension impulsionnelle (200ns/540 μs), des streamers positifs subsoniques sous forme de buisson dont la vitesse est

située entre 120 et 270m/s, à $U_+=9.27\text{kV}$ et $r_p=0.5\mu\text{m}$. Lorsque le niveau de tension est augmenté, des streamers filamenteux apparaissent.

En polarité négative, les streamers prennent naissance à partir d'un champ à la pointe $E>2.5\text{MV/cm}$ sous forme de buisson dont les branches (de diamètre de l'ordre de 30 à 70 μm) se propagent simultanément dans les directions axiale et latérale jusqu'à atteindre l'électrode opposée. Aux valeurs de champ plus élevées, le streamer apparaît sous forme de buisson assez compact et se propage à une vitesse légèrement supérieure à celle des précédents. Lorsque le champ est très élevé, une seule branche atteint l'électrode opposée à une vitesse pouvant dépasser les 100km/s [5].

Selon Yamashita et al. [16,18], la structure des streamers négatifs dans le cyclohexane, passe d'une forme sphérique à une forme hémisphérique puis en "pagode" et finalement en buisson, lorsque la tension appliquée ou le rayon de courbure de l'électrode pointe sont augmentés.

Ces auteurs rapportent également que les streamers, dans le cyclohexane soumis à une tension impulsionnelle, apparaissent sous forme de court filament qui se développe, en un court instant ($\approx 40\text{ns}$), en sphère lorsque la polarité de la pointe est négative et en buisson lorsqu'elle est positive. Dans le polyether perfluoré, les streamers, aussi bien positifs que négatifs, sont filamenteux (peu de ramifications) mais les streamers positifs se propagent à une vitesse environ 10 fois supérieure à celle des négatifs ($v_+=30\text{km/s}$ et $v_-=4.5\text{km/s}$).

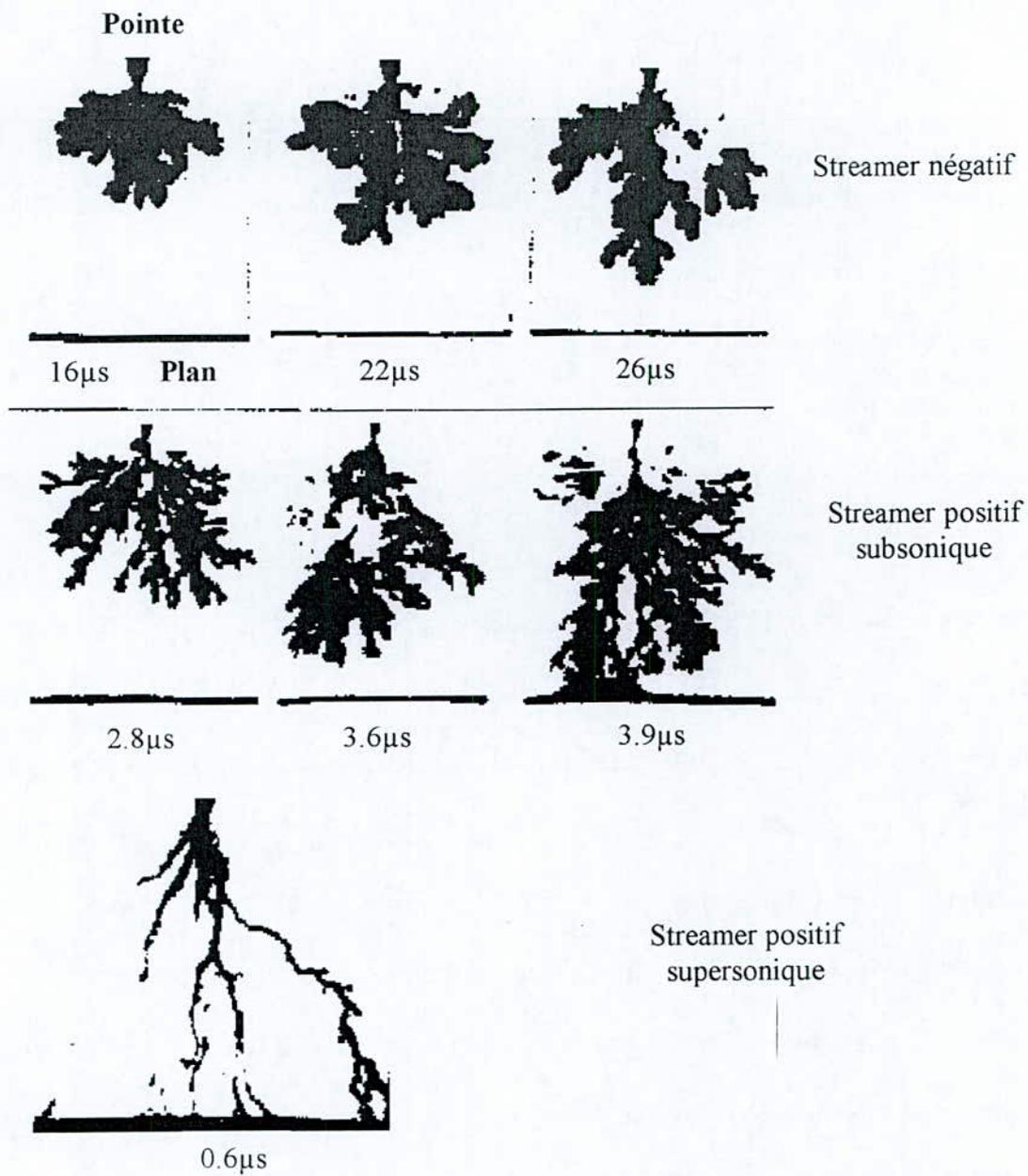


Figure 1 : Types de streamers usuellement observés dans le cyclohexane selon [19], $d=2\text{mm}$, $r_p=3\mu\text{m}$, $U=40\text{kV}$

1.4- Fréquence d'apparition des streamers

Plusieurs auteurs ont mis en évidence l'aspect statistique de l'apparition, dans les mêmes conditions expérimentales, de streamers subsoniques et supersoniques [16,20,21]. La fréquence d'apparition des streamers supersoniques augmente avec le niveau de tension appliqué [20,21] ou/et la pression hydrostatique du liquide [21]. De même, l'apparition des streamers subsoniques est favorisée par l'augmentation de la température [21]. Selon Yamashita et al [16], lorsque le rayon de courbure de la pointe est inférieur à une valeur critique et la tension légèrement supérieure à un certain seuil, les deux types de streamers peuvent exister. Pour une pointe de rayon $r_p = 15\mu\text{m}$, ils enregistrent dans le cyclohexane des streamers en buisson à $U_+ = 27.3\text{kV}$ et des streamers filamenteux à $U_+ = 27.8\text{kV}$.

Dans le cas de faibles rayons de courbure et de faibles tensions, seuls les streamers en buisson sont observés.

1.5- Courants et émissions lumineuses accompagnant les streamers

Le courant transitoire des streamers est généralement accompagné d'émissions lumineuses; une bonne corrélation entre les formes de ces deux signaux caractéristiques a été largement observée. L'amplitude et la forme du courant et de l'émission lumineuse correspondante dépendent de plusieurs paramètres.

Pour les faibles distances inter électrodes ($d < 5\text{cm}$), les courants sont faibles (quelques mA) et leur forme dépend essentiellement de la polarité de l'électrode pointe. En géométrie pointe-plan, le courant des streamers lents (sous forme de buisson) est constitué de pics discrets (de durée $< 10\text{ ns}$), irrégulièrement espacés, dont l'amplitude croît généralement dans le temps au fur et à mesure que le streamer se propage [1,2,5,22,23]. La figure 2 montre un

exemple type de streamer négatif enregistré simultanément avec le courant et la charge correspondante [24].

Le signal lumineux le long de l'intervalle inter électrodes présente une forme similaire à celle du courant. Cependant, certains auteurs ont observé des pics de courant sans que ceux-ci soient accompagnés de pics de lumière et vice-versa [25,26]. Le nombre et l'amplitude des impulsions de courant et d'émission lumineuse augmentent avec le niveau de tension appliqué, pour un liquide donné [1,6,27].

Le signal lumineux émis par les streamers positifs filamenteux rapides est constituée d'une impulsion unique et le courant présente une composante continue [1,6,27-30] sur laquelle se superposent d'autres impulsions de fréquence plus régulière que celles relatives aux streamers négatifs [1,3,31-35]. Le courant augmente de façon continue jusqu'à atteindre une valeur maximale généralement attribuée à l'arrivée du streamer sur la barrière isolante recouvrant l'électrode plane [1,5,15,23,36]. La figure 3 illustre un cas de streamer positif rapide et le courant correspondant [17].

Sous les deux polarités, l'amplitude du courant et l'intensité de l'émission lumineuse augmentent avec la vitesse de propagation du streamer. Les courants des streamers rapides sont toujours supérieurs à ceux des streamers lents.

Pour les longues distances (5 à 100cm), les courants de streamers aussi bien positifs que négatifs, sont constitués de pics irrégulièrement espacés [37-41]. L'amplitude de ces pics peut atteindre quelques ampères [41,42]. La durée de chaque pic dépend du liquide testé [42] ; elle est inférieure à 20ns dans l'huile minérale soumise à une impulsion positive (1.2/700µs) en longues distances (d=20cm) et de l'ordre de 300ns dans le benzyl-toluène. La forme du courant et de l'émission lumineuse des streamers positifs et négatifs sous tension alternative [39,40] est similaire à celle observée sous tensions impulsionnelle ou en créneau de tension [37,38].

De la même manière que pour le courant, la forme et l'amplitude de la charge électrique des streamers positifs et négatifs dépendent de la vitesse de ces streamers [5]. La charge globale des streamers positifs et négatifs rapides est plus importante que celle des streamers lents. Cependant, La vitesse de propagation du streamer et sa charge totale sont d'autant plus faibles que la distance inter électrodes est élevée et/ou le niveau de tension appliqué est faible [5].

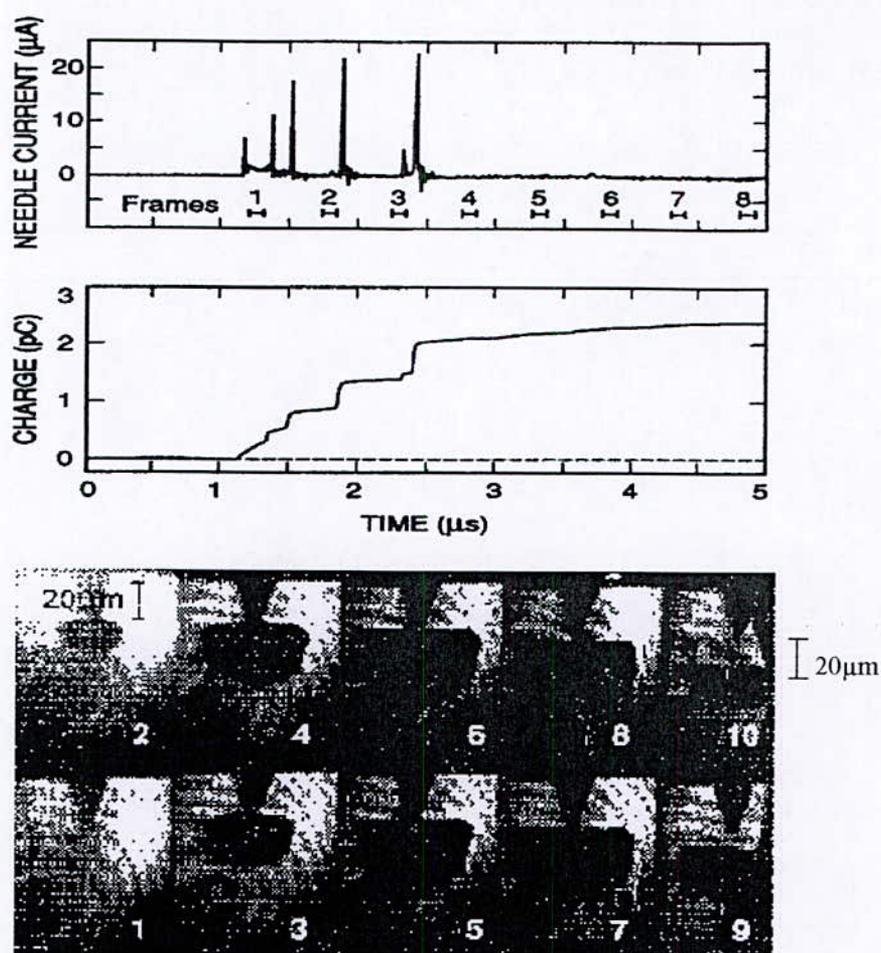


Fig.2 : Enregistrement simultané de l'évolution d'un streamer négatif dans l'hexane avec le courant et la charge correspondante. $U=15.5\text{kV}$; $d=3.2\text{mm}$; $r_p=1\mu\text{m}$. L'intervalle entre images et le temps d'exposition sont respectivement de 512 et 102ns [24].

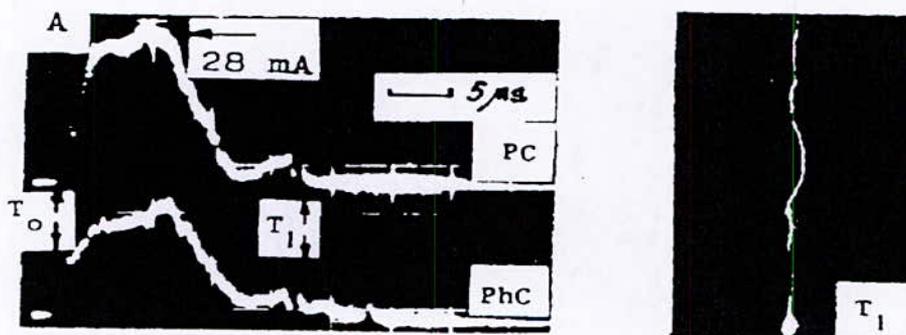


Fig.3 : Enregistrement de la phase finale d'un streamer positif rapide (à droite) dans l'huile de transformateur et le courant et émission lumineuse correspondante (à gauche). $U=100\text{kV}$; $d=50\text{mm}$; $r_p=5\mu\text{m}$ [17].

2- Influence des propriétés physiques du liquide :

2.1- Influence de la viscosité :

L'influence de la viscosité sur la forme et la vitesse des streamers est différemment appréciée selon les auteurs.

Badent *et al* [43], ont mené une étude sur une huile de transformateur soumise à des températures entre -40 et $+25$ °C, lui donnant ainsi des viscosités comprises entre 15 et 3114 cSt. Ils trouvent que les streamers positifs vont d'une forme en parapluie à filamenteuse et les négatifs vont d'une forme en buisson à celle en éventail, lorsque la viscosité est augmentée.

En considérant ainsi cette évolution des formes, les vitesses devraient augmenter avec la viscosité, à l'inverse de ce qui a été rapporté par Watson *et al* [7] sur les huiles silicones. En considérant des polybutènes de viscosité variant de 90 à 4.10^5 cSt, Beroual [12] n'a pas observé d'effet significatif de la viscosité.

Le temps de retard au claquage diminue et la tension d'initiation des streamers positifs augmente avec l'accroissement de la viscosité dans l'huile minérale [43], alors que dans les polydiméthylsiloxanes, la variation du temps de retard au claquage est insignifiante lorsque la viscosité est multipliée par 1000 [12].

2.2- Influence de la masse volumique:

Une tentative de classification des liquides diélectriques en fonction de leur masse volumique et de la vitesse des streamers positifs s'y propageant, a été établie par Sakamoto et Yamada [11]. Cette classification trouve ses limites dans le cas des liquides halogénés où la vitesse des streamers est nettement plus élevée que dans les liquides sans halogènes comme l'a montré Béréal [12].

2.3- Structure du liquide

La structure et l'affinité électronique des molécules d'un liquide sont des caractéristiques intrinsèques déterminantes quant à la forme et la vitesse des streamers. Dans les liquides halogénés, les vitesses des streamers positifs et négatifs sont plus importantes que celles obtenues dans les liquides sans halogènes [5] (Tableau1). La présence d'un seul atome de chlore dans le chlorocyclohexane mène à une multiplication de la vitesse des streamers négatifs par un facteur 10 par rapport à celle obtenue dans le cyclohexane pur [1]. Dans un système d'électrodes pointe-plan, le streamer positif est plus filamentaire, donc plus rapide, dans le chlorocyclohexane que dans les autres liquides tels que le cyclohexane, le transdécahydronaphthalène et le cis-décahydronaphthalène [1].

Dans la plupart des hydrocarbures saturés, avec des pointes de rayon $r_p > 10 \mu\text{m}$, le streamer négatif présente une structure en buisson alors que dans les liquides aromatiques purs (hydrocarbures non saturés), on observe une structure filamentaire [8]. Les streamers négatifs filamenteux sont également observés dans l'hélium liquide [5] et l'azote liquide [44].

3- Influence des variables d'état

3.1- Influence de la pression:

Il est connu depuis longtemps qu'en appliquant une pression à un isolant liquide donné, on améliore de façon importante la rigidité diélectrique de celui-ci [45].

Le volume, le courant et la lumière émise par les streamers négatifs sont fortement affectés par l'application d'une modeste pression hydrostatique [2,5,8]. Lorsque la pression augmente, le nombre et l'amplitude des pics de courant, la lumière émise et le volume du streamer négatif diminuent [8,12,18]; ils disparaissent pour une pression suffisamment élevée. La pression hydrostatique nécessaire à la disparition de ces impulsions est d'autant plus importante que la charge correspondant à ces pics de courant est élevée. En général, la

pression nécessaire à la disparition des streamers positifs rapides est plus importante que celle nécessaire aux streamers négatifs lents [2,8].

Aucun effet appréciable n'a été cependant relevé lorsque la pression est diminuée en dessous de la pression atmosphérique [5].

3.2- Influence de la température

Selon Hoch et Reinders [46], la rigidité de l'huile minérale est meilleure entre 20 et 80°C. Elle est cependant améliorée au plus de 30% à la température de 60 °C, que ce soit dans l'huile seule ou en présence de 35% de CCl₄.

En portant l'hexane jusqu'à une température proche de son point d'ébullition, McGrath et Nelson [47] n'ont observé pratiquement aucun effet sur les phénomènes de préclaquage. La vitesse des streamers positifs passe de 2.3 km/s à seulement 2.7 km/s lorsque la température varie de 5 à 42 °C [48]; celle des streamers négatifs ne subit aucune variation.

La vitesse des streamers positifs dans le cyclohexane passe de 1.9 km/s à 3km/s lorsque la température est élevée de 18 à 76°C [48] alors qu'aucun changement dans la tension de génération n'a été relevé dans ce liquide [19]. Seule une légère augmentation du nombre et de l'amplitude des pics de courant et de lumière, a été observée. Par contre ; lorsqu'on baisse la température à une valeur comprise entre -6 et -30 °C, la tension de génération devient beaucoup plus importante qu'aux températures supérieures à +5 °C : Elle augmente de 15 à 25 kV en polarité négative et de 17 à 26 kV en polarité positive [19].

4- Influence du niveau de tension appliqué

Nakao et al. [23] ont rapporté que dans le n-hexane, les streamers positifs deviennent plus filamenteux et leur vitesse augmente lorsque la tension ou/et la concentration d'un additif comme le N,N'-diméthylaniline (D.M.A.) augmente.

Selon Yamashita et al.[16], lorsque la tension (impulsion : 200ns/540µs) augmente, la forme des streamers négatifs dans le cyclohexane change de sphère en hémisphère pour prendre une forme en buisson lorsque la tension est suffisamment élevée.

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

Beroual [19] a observé une augmentation de la vitesse des streamers aussi bien positifs que négatifs dans le cyclohexane lorsque la tension est augmentée. Elle est de l'ordre de 30m/s à U=20kV et passe à environ 80m/s à U=40kV, lorsque la polarité de la pointe est négative. En polarité positive, elle est de l'ordre de 0.3km/s à U=25kV et passe à 0.5km/s pour une tension de 40kV.

La vitesse des streamers négatifs est également affectée par la pente d'une rampe de tension [1]. Elle est de l'ordre de 40m/s pour une pente de $4,3 \cdot 10^{10}$ V/s et passe à 100m/s lorsque la pente est de $2,4 \cdot 10^9$ m/s. Ces résultats ont été obtenus pour une distance inter-électrodes de 2mm et un rayon de la pointe de 3µm.

5- Influence du rayon de courbure de la pointe

Pour obtenir des valeurs de champ très élevées pour des tensions modestes (quelques kilovolts), on utilise des électrodes pointes dont les rayons de courbure r_p peuvent être inférieures à 1µm. La phase d'initiation et la forme des streamers initiés sont fortement dépendants de l'intensité du champ électrique local alors que la propagation est également entretenue par le champ électrique moyen. En tension alternative et impulsionnelle, Les streamers sont générés à $E_0 > 10\text{MV/cm}$ lorsque r_p est inférieur à 3µm, alors que pour

$r_p > 100 \mu\text{m}$, ils sont générés à $E_0 > 1 \text{MV/cm}$ [5]. E_0 est le champ harmonique sur la pointe assimilée à une hyperboloïde de révolution sans injection de charges.

D'après Yamashita *et al* [16], la tension de génération des streamers augmente avec le rayon de courbure de la pointe; elle est plus élevée lorsque la pointe est positive que lorsqu'elle est négative. Il existe un rayon de courbure critique r_c ($r_c = 5$ à $6 \mu\text{m}$ dans le cyclohexane [2,16]) à partir duquel la forme et la vitesse des streamers change. Aux rayons $r_p > r_c$, seuls les streamers en buisson sont observés en pointe négative et, aux rayons $r_p < r_c$, les formes en sphère, hémisphère et en "pagode" sont également observées. En polarité positive, lorsque la tension appliquée est faible et $r_p < r_c$, la structure des streamers est en forme de buisson, alors que pour les fortes tensions et $r_p > r_c$, elle devient filamentaire.

6- Influence des additifs

6.1- Additifs capteurs d'électrons

Afin de montrer l'influence des processus électroniques sur les phénomènes de préclaquage, Devins et al. [6] étudièrent séparément l'influence d'additifs capteurs d'électrons et à bas potentiel d'ionisation. L'addition d'une faible quantité (0.05 mole/l) d'additif capteur d'électrons non ionique tel que l'hexafluorure de soufre (SF_6) ou le chlorure d'éthylène ($\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$) à l'huile naphénique ou au 2,2,4 triméthyl-pentane, rend les streamers négatifs plus filamenteux et augmente leur vitesse d'un facteur 5. Un effet similaire est rapporté sur l'action du CCl_4 et le $\text{CF}_3(\text{CF}_2)(\text{CF}_3)$ sur le n-hexane [23].

A. Beroual *et al* [5] obtiennent une multiplication par 10 de la vitesse des streamers négatifs en ajoutant 0.04 M/l de CCl_4 au cyclohexane. Il n'y a pas d'effet notable de ces additifs sur les streamers positifs dans les mêmes liquides.

L'action du CCl_4 augmente également le nombre et l'amplitude des pics de courant des streamers négatifs dans le cyclohexane [8] et dans le n-hexane [23]. Lorsque la concentration de CCl_4 atteint 0.08 M/l, le courant tend vers une forme ayant une composante continue [8].

6.2- Additifs à bas potentiel d'ionisation

L'addition d'un composé non ionique à bas potentiel d'ionisation tel que le N,N-dimethylaniline (DMA) n'a pas d'effet sur la vitesse des streamers négatifs dans une huile naphénique (Marcol 70) et dans le 2,2,4-triméthyl-pentane [6], tandis qu'elle augmente (d'un facteur 2 ou 3) celle des streamers positifs. Aucun effet remarquable de cet additif n'est cependant observé sur la vitesse des streamers positifs dans le n-hexane [23].

A. Beroual et al. [5] obtiennent une légère augmentation de la vitesse des streamers négatifs et une multiplication par 3 de celle des streamers positifs, en ajoutant 0.05 mole/l de tétraméthyle paradiphénylamine (TMPD) au cyclohexane. Il existe cependant une valeur de la concentration (0.4 à 0.5 mole/l) au dessus de laquelle aucune augmentation significative de la vitesse n'est observée [5,6].

7- Analyses spectrale et chromatographique :

Des analyses spectroscopiques de la lumière émise par les streamers ont été menées [5,11,49,50]. Elles ont révélé dans le n-hexane, la présence d'hydrogène atomique et moléculaire et de carbone (C_2 et C_3) ainsi que des traces de métal provenant des électrodes.

Dans le cyclohexane, le mono-dibenzyle-toluène (MDBT) et le phénylxyléthane (PXE), il a été observé la formation d'hydrogène aussi bien atomique que moléculaire et des substances carbonées [49]. La formation de ces espèces a été attribuée à la dissociation des molécules du

liquide pouvant être engendrée par un mécanisme d'avalanche électronique similaire à celui observé dans les gaz.

Les analyses chromatographiques des gaz dissous, générés par les streamers, dans le PXE et le MDBT [49] ont mis en évidence l'existence de H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 et C_2H_2 . La formation de ces produits a été attribuée à la recombinaison du carbone et de l'hydrogène provenant de la dissociation et la fragmentation des molécules du liquide.

8- Modèles d'évaluation des vitesses de streamers

8.1- Modèle proposé par Devins, Rzad et Schwabe [6]:

En utilisant la théorie de Zener basée sur l'effet tunnel, pour calculer la concentration "c" des porteurs de charge positifs et négatifs contenus dans un canal cylindrique conducteur de rayon r_s , Devins et al. [6] déduisent le coefficient d'ionisation :

$$\gamma = \frac{e.E.a}{h} \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2 \cdot m_e \cdot a \cdot V_{io}^2}{h^2 \cdot e.E}\right] \quad (1)$$

En utilisant une distribution de champ sphérique, ils donnent l'expression de la vitesse:

$$v = \left(\frac{a \cdot e^3 \cdot E_0^3}{\pi \cdot m_e \cdot V_{io}^2}\right)^{0,5} \cdot \frac{n}{c} \cdot r_s \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\pi^2 \cdot m_e \cdot a \cdot V_{io}^2}{h^2 \cdot e.E_0}\right)^{1/2} \quad (2)$$

avec

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$ et $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} kg$, la charge et la masse de l'électron.

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} J.s$, la constante de Planck.

$V_{io} = 7 \div 15 eV$, le potentiel d'ionisation des molécules en phase liquide (variable d'un liquide à l'autre).

$a = 0,63 \cdot 10^{-9} m$, la distance inter-moléculaire.

n , le nombre de molécules par unité de volume [c.c].

c , la concentration des porteurs positifs et négatifs.

$$\frac{c}{n} = \gamma$$

E_0 , le champ à l'extrémité du streamer de rayon r_s ($E_0 = 2 \div 80 MV/cm$), $r_s = 10 \mu m$.

Les vitesses obtenues par ce modèle augmentent de manière quasi exponentielle avec le niveau de tension appliquée. De plus, elles sont très dépendantes de la distance intermoléculaire 'a' ; une diminution de celle-ci de 6.3 \AA à 5 \AA augmente la vitesse de plus d'un ordre de grandeur.

Les potentiels d'ionisation V_{io} dans les liquides non polaires se situent entre 6eV et 10eV [51]. Une légère baisse du potentiel d'ionisation V_{io} , de 8 à 7eV, multiplie la vitesse par un facteur de l'ordre de 70. Par ailleurs, si on prend l'exemple de liquides largement étudiés comme le n-hexane ($V_{io}=8.6\text{eV}$) et le n-pentane ($V_{io}=9.15\text{eV}$) qui ont respectivement des vitesses moyennes pour les streamers filamenteux de 3.86 km/s et 4.23km/s [5], on obtient par ce modèle des vitesses dans le n-pentane 14 fois supérieures à celles du n-hexane.

Ce modèle, quoique donnant des variations proches de celles mesurées expérimentalement pour les vitesses de streamers supersoniques (basés sur les processus électroniques), ne tient pas compte des phénomènes lents donnant naissance à des streamers buissonneux. De la même manière que le modèle proposé par Felici [52], celui-ci est basé sur la propagation d'un streamer sous forme d'un seul canal conducteur.

Seule la valeur $\gamma=10^{-3}$ donne des grandeurs de vitesses plausibles; les valeurs ($1, 10^{-2}, 10^{-4}$ et 10^{-6}), utilisées dans la littérature [1], donnent des vitesses excessivement élevées pour l'intervalle de champ considéré.

8.2- Modèles proposés par Watson et Watson *et al.* :

Ce sont des modèles purement électrohydrodynamiques (EHD) basés sur le développement d'une cavité gazeuse préexistante ou créée par évaporation locale ou cavitation du liquide. Lors de son expansion, cette perturbation se développe en streamer. La vitesse de propagation est obtenue en combinant les équations des forces électrostatique et électrodynamique agissant à la surface du streamer.

1^{er} Modèle [53] :

Watson considère une cavité gazeuse créée au sein du liquide en expansion entre les électrodes. La cavité est assimilée à une sphère conductrice au même potentiel que la cathode. La vitesse est donnée par la relation:

$$V_{c\omega} = \sqrt{\frac{\epsilon}{3 \cdot \rho}} \cdot E(R_S)$$

en supposant $E(R_S) = U/R_S \cdot \sqrt{2}$, on déduit l'expression de la vitesse:

$$v_{c\omega} = \left(\frac{U}{R_S} \right) \left(\frac{\epsilon}{6 \cdot \rho} \right)^{1/2}$$

et en prenant

$$v_{c\omega} = \frac{2 \cdot R_S}{t}$$

il vient

$$R_S = \left[U \cdot t \cdot \left(\frac{\epsilon}{24 \cdot \rho} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Watson [53] donne une expression différente de l'équation (3), sous la forme :

$$R_S = \left[U \cdot t \cdot \left(\frac{2 \cdot \epsilon}{3 \cdot \rho} \right)^{1/2} \right]^{1/2}$$

En prenant les valeurs typiques : $R_S=5\text{mm}$, $U=60\text{kV}$, $\epsilon_r=2$ et $\rho=600\div 1500\text{kg/m}^3$ pour les liquides, on obtient un temps de propagation de l'ordre de $12\div 19\text{ms}$. Ce temps est très élevé par rapport à ceux mesurés expérimentalement. De plus, l'auteur ne fait pas de distinction entre les streamers positifs et négatifs qui présentent dans la plupart des liquides des formes et des vitesses différentes.

2^{ème} Modèle [7,54]:

Dans ce modèle, le streamer est assimilé à une cavité gazeuse générée au voisinage de l'électrode pointe et qui se développe dans le milieu isolant en moins d'une μs , avec une vitesse qui diminue dans le temps. Les forces mises en jeu dans la propagation dépendent principalement de la viscosité du liquide.

a) Expansion d'une bulle limitée par l'inertie dans un milieu de faible viscosité

En considérant la pression électrostatique P_{es} donnée par

$$P_{es} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot E^2(R_S)$$

et en prenant

$$E(R_S) = \frac{U}{R_S \left[\frac{L_a}{R} \right]^{\frac{1}{2}}}$$

Watson et al. [7] obtiennent

$$P_{es} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot \frac{U^2}{L_a^{1/2} \cdot R_S^{3/2}}$$

La force électrostatique serait alors

$$F_{es} = \int_V P_{es} \cdot dV = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \frac{U^2 \cdot R_S^{3/2}}{L_a^{1/2}} \quad (4)$$

Par ailleurs, la force d'inertie F_{in} est

$$F_{in} = \int_0^t \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot dt = \frac{8}{3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_S^7 \cdot \frac{1}{t} \quad (5)$$

En égalisant les équations (4) et (5), il vient

$$R_S = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon \cdot U^2 \cdot t^2}{\rho \cdot L_a^{1/2}} \right)^{2/7}$$

au lieu de l'expression donnée par Watson et al [7]:

$$R_S = \left(\frac{2 \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot U^2 \cdot t^2}{L_a^{1/2} \cdot \rho} \right)^{2/7}$$

Les valeurs obtenues à partir de ces deux expressions sont évidemment différentes et la concordance avec les mesures expérimentales n'est pas aussi bonne comme cela a été rapporté par ces auteurs [7,54].

b) Expansion d'une bulle limitée par la viscosité

Dans le cas d'un milieu assez visqueux, Watson et al. [7] font intervenir l'énergie due aux effets visqueux, dissipée dans le fluide enveloppant la cavité. Cette énergie par unité de temps est donnée par l'expression suivante :

$$W_v = 32 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R_S \cdot v^2 / 3 = \frac{32}{3} \cdot \pi \cdot \eta \cdot R_S \cdot \frac{4 \cdot R_S}{t^2} \quad (6)$$

Par ailleurs, l'énergie fournie par la pression électrostatique s'exprime par unité de temps :

$$W_D \approx 4.\pi.R_S^2 .v.P_{es} = 4.\pi.R_S^2 \left(\frac{2.R_S}{t} \right) \left(\frac{1}{2} .\varepsilon. \frac{U^2}{L_a^{1/2} .R_S^{3/2}} \right) = \frac{4.\pi.\varepsilon.U^2.R_S^{3/2}}{L_a^{1/2} .t} \quad (7)$$

En égalant les deux énergies exprimées par les équations (6) et (7), on obtient:

$$R_S = \left[\frac{3.\varepsilon.U^2.t}{32.\eta.L_a^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (8)$$

au lieu de

$$R_S = \left[\frac{3.\varepsilon.\varepsilon_0.U^2.t}{10.\eta.L_a^{1/2}} \right]^{2/3}$$

donnée par Watson et al [7].

L'équation (8) donne des résultats différents de ceux obtenus expérimentalement [7,55] en considérant des viscosités mesurées généralement à 20°C. La viscosité 'η' d'un liquide varie en fonction de sa température [43]. Il est par conséquent difficile de l'estimer lors de la propagation d'un streamer.

c) Transition au streamer

Lorsque l'instabilité de la surface de la cavité due aux phénomènes EHD atteint une certaine amplitude, le streamer prend naissance à partir de cette cavité, sous forme de colonne de gaz ionisé, et se propage dans le fluide visqueux sous l'action de la force électrostatique supposée concentrée à la tête du streamer.

Pour calculer la force électrostatique, les auteurs considèrent un champ similaire à celui d'une configuration hyperboloïde-plan [7].

$$E(R_S) = \frac{U}{R_S^{3/4} .L_a^{1/4}}$$

et donc

$$F_{es} = \frac{1}{2} \varepsilon \cdot E^2 \int_S dS,$$

en supposant un streamer en monocanal cylindrique de rayon R_S évoluant entre deux électrodes (pointe et plan) distantes de d , on obtient :

$$F_{es} = \pi \cdot \varepsilon \cdot U^2 \cdot \left(\frac{d}{R_S} \right)^{1/2}$$

au lieu de

$$F_{es} = \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2 \cdot \left(\frac{R_S}{d} \right)^{1/2}$$

Par ailleurs, la force par unité de surface due à la friction superficielle, estimée par Rayleigh [56], est :

$$\frac{dF}{dS} \approx \rho \cdot v \cdot \left[\frac{\nu}{\pi \cdot t} \right]^{1/2}$$

où v est la vitesse du streamer et ν la viscosité cinématique du fluide.

En posant $t = \frac{x}{v}$, il vient

$$F = \int_S \rho \cdot v \cdot \left[\frac{\nu \cdot v}{\pi \cdot x} \right]^{1/2} \cdot dS = 4 \cdot \pi \cdot R_S \cdot \rho \cdot \left[\frac{\nu \cdot v^3 \cdot l}{\pi} \right]^{1/2}$$

l étant la longueur du streamer.

En égalisant cette force à la force électrostatique, on obtient :

$$v = \left[\frac{\sqrt{\pi} \cdot \varepsilon \cdot U^2 \cdot d^{1/2}}{4 \cdot \rho \cdot (\nu \cdot l \cdot R_S^3)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (9)$$

Dans ce modèle, les auteurs [7] obtiennent également une expression différente de l'expression (9) que nous avons déterminée à partir des mêmes équations de base ; ils donnent :

$$v = \left[\frac{\sqrt{\pi} \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot U^2}{4 \cdot \rho \cdot (\nu \cdot l \cdot R_S \cdot d)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (10)$$

En prenant l'exemple de l'huile silicone DC200 ($\nu = 2 \text{ cst}$, $\epsilon_r = 2,6$), le rayon d'une branche du streamer est de l'ordre de $8 \mu\text{m}$ [7]. En prenant $U = 11,5 \text{ kV}$, $\rho = 930 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et $l = d = 0,6 \text{ mm}$, on obtient de l'équation (9) une vitesse de l'ordre de $1,3 \text{ km/s}$. Elle est beaucoup plus grande que celles mesurées expérimentalement par les mêmes auteurs [7] qui sont de l'ordre de 50 à 150 m/s . Cette vitesse peut être ramenée à des valeurs voisines de celles mesurées expérimentalement en considérant un streamer constitué de plusieurs branches au lieu d'une, comme cela a été supposé par les auteurs. Elle varie, par ailleurs, en croissant lorsque le nombre de branches ou /et le rayon de ces branches décroît. Par contre l'expression (10), proposée par Watson et al. [7], donne des variations contraires à celles de l'expression (9).

8.3- Modèle proposé par N.Felici [52]:

En assimilant le streamer à un canal cylindrique allongé, conducteur et contenant une phase gazeuse ionisée, Félici a tenté d'analyser la façon dont l'énergie électrique apportée au système était dépensée dans le milieu liquide. En effet, le travail des forces électriques est dépensé pour créer cette phase aux dépens du liquide, à l'ioniser, puis à repousser le liquide au fur et à mesure que le canal avance. La phase gazeuse est supposée constituée de vapeur du liquide.

Soit ' S_e ' la section du streamer, ' l ' sa longueur dont l'extrémité vive avance dans le diélectrique vierge avec une vitesse ' v '. L'autre extrémité est reliée à une source de tension ' U ' qui fournit un courant ' I ' pendant la progression du canal.

Le canal est considéré électriquement neutre, relativement bon conducteur et ayant une certaine résistance électrique ' R_e '. Dans ce cas, la condition nécessaire à la propagation est :

$$R_e \cdot I \ll U.$$

Le travail des forces électrostatiques à l'extrémité vive est par unité de temps :

$$W_e = (\epsilon \cdot E^2 / 2) \cdot S_e \cdot v$$

Ce travail est dépensé à ioniser le milieu et aussi à l'échauffer, le vaporiser et le déplacer.

En égalant ce travail à l'accroissement de l'énergie du système à potentiels constants, on obtient :

$$U \cdot I = (\epsilon \cdot E^2 / 2) \cdot S_e \cdot v$$

et

$$I = (\epsilon.E^2 / 2).S_e.v / U.$$

La condition de propagation devient alors :

$$\frac{\epsilon.E^2 . l.v}{K.q.U^2} \ll 1$$

où K est la mobilité des électrons et q leur densité de charge.

L'auteur donne par la suite une estimation des énergies et de l'intensité du champ nécessaires à la création des différentes phases du streamer.

- Vaporisation :

En se basant sur la loi de Trouton où la chaleur molaire de vaporisation d'un liquide est d'environ $80.T$ joules, T étant la température d'ébullition. Et, sachant qu'une mole occupe un volume approximatif de $20000.(T/T_0)$ cm³, T₀ étant la température normale, Felici [52] en déduit que par m³ de vapeur, il faut fournir environ $1,2.10^6$ J (soit $1,2.10^6$ J/m³).

On a donc la condition de vaporisation: $\epsilon.E^2/2 > 1,2.10^6$, d'où un champ $E > 3$ MV/cm pour un liquide de constante diélectrique $\epsilon_r=2$.

Le champ à l'extrémité vive doit donc être très élevé, ce qui est compatible avec les observations qui donnent au streamer un diamètre de quelques microns.

-Décomposition :

L'énergie requise est comparable à la précédente ou plus grande. En l'absence de données précises, il est à retenir que la décomposition requiert une énergie supplémentaire qui conduit à un champ nominal E de l'ordre de 5 à 10 MV/cm.

-Déplacement :

En ne tenant compte que de l'inertie, le travail par unité de temps est :

$$W = (\rho.v^2/2).S$$

ρ étant la masse spécifique du liquide.

On doit donc avoir $\epsilon.E^2/2 > \rho.v^2/2$

et pour le champ,

$$E > v \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\epsilon}}$$

La mobilité électrohydrodynamique $\sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}}$ est d'environ $2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ pour les liquides peu polaires. Pour une vitesse de 10^5 cm/s , mesurée expérimentalement, on a $E > 50 \text{ MV/cm}$, valeur très élevée.

-Ionisation :

Soit q la densité de charge électronique dans le canal et eU_i l'énergie totale que doit recevoir du champ un électron de charge e pour créer une paire électron-ion, il vient :

$$q \cdot U_i = \frac{\epsilon \cdot E^2}{2} - \frac{\rho \cdot v^2}{2} - L'$$

En désignant par L' , l'énergie totale de vaporisation et de décomposition, la condition $R \cdot I \ll U$ devient :

$$\frac{\epsilon \cdot E^2 \cdot U_i \cdot l \cdot v}{K \cdot U^2 \cdot \left(\frac{\epsilon \cdot E^2}{2} - \frac{\rho \cdot v^2}{2} - L' \right)} \ll U.$$

en prenant $y = \sqrt{\frac{\rho}{\epsilon}} \frac{v}{E}$ comme variable réduite toujours supérieure à l'unité, on obtient :

$$\frac{2 \cdot U_i \cdot l \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}} \cdot E}{K \cdot U^2} \cdot \frac{y}{1 - y^2 - \frac{2 \cdot L'}{\epsilon \cdot E^2}} \ll 1. \quad (11)$$

Le champ d'ionisation peut aller au plus à $100 \div 200 \text{ MV/cm}$ et la vitesse ainsi déterminée ne saurait dépasser le km/s . Cet ordre de grandeur des vitesses est plutôt caractéristique des streamers lents (de nature principalement gazeuse, comme le suppose l'auteur) dont la forme n'est pas filamentaire.

Le fait d'assimiler ce genre de streamers à un seul filament est en contradiction avec les observations expérimentales. Ils devraient être plutôt assimilés à une forme sphérique [7,54] où à un ensemble de filaments [8,12] prenant naissance à partir de l'électrode pointe.

8.4- Modèle proposé par A. Beroual [8,12]:

A. Beroual a proposé un modèle électro-énergétique tenant compte de toutes les formes d'énergie pouvant prendre part dans les phénomènes des streamers: Energie de vaporisation, de décomposition, énergie capillaire due à l'interface liquide - gaz, de déplacement et d'ionisation. Ce modèle est le seul à avoir établi une relation entre le courant, la charge, la vitesse et le mode de propagation des streamers. Il a été utilisé avec succès dans les liquides, l'air et les interfaces solide/liquide et solide/gaz isolants [57,58].

En considérant un streamer constitué de n branches, l'énergie électrique est donnée par :

$$W_t = \sum_{j=1}^n q_j \cdot E_j \cdot dl_j$$

et l'énergie cinétique :

$$W_c = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} m_j \cdot v_j^2 = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} (\rho \cdot \pi \cdot r_j^2 \cdot dl_j) \cdot v_j^2.$$

où r_j , dl_j , v_j , q_j et E_j sont respectivement le rayon de la branche 'j', son déplacement, sa vitesse, sa charge et le champ électrique à sa tête vive. ρ est la masse volumique de la phase gazeuse. Si β est la fraction de l'énergie totale dédiée au déplacement du streamer, on aura

$$W_c = \beta \cdot W_t$$

$$\text{avec } 0 \leq \beta \leq 1$$

La vitesse correspondant à chaque déplacement dl_j du streamer, sera :

$$v_j^2 = \frac{2E_j}{\pi \cdot r_j^2 \cdot \left(\frac{\beta}{\rho}\right)^{-1}} \int i_j dt = \frac{2}{\pi \cdot r_j^2} \frac{\beta}{\rho} E_j \int i_j dt \quad (12)$$

Le champ à la tête de chaque branche correspondant à chaque charge élémentaire q_j est :

$$E_j = \frac{D}{\epsilon} = \frac{q_j}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r_j^2} \quad (13)$$

où D est la densité de charge surfacique à la tête vive du streamer assimilée à une demi sphère de rayon r_j .

Par ailleurs, à partir des relations (12) et (13), on peut obtenir l'équation de la vitesse, sous la forme:

$$v_j = K_j \cdot q_j$$

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

d'où l'expression de la vitesse instantanée d'une branche :

$$v_j = \left(\frac{\beta}{\epsilon \cdot \rho} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{\pi \cdot r_j^2} \right) \cdot q_j \quad (14)$$

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

Soit $t_j = t_{pj} + t_{0j}$

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

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

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

$$l_j = v_{pj} \cdot t_{pj} + v_{0j} \cdot t_{0j}$$

Par ailleurs, $l_j = v_{aj} \cdot t_j$ où v_{aj} est la vitesse moyenne de l_j .

d'où

$$v_{aj} = \left(\frac{t_{pj}}{t_j} \right) \cdot v_{pj} + \left(\frac{t_{0j}}{t_j} \right) \cdot v_{0j}$$

Il apparaît que la vitesse augmente lorsque t_{0j} décroît.

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

$$\text{et } l_s = \sum_{j=1}^n l_j = v_{as} \cdot \left(\sum_{j=1}^n t_j \right)$$

où v_{as} est la vitesse moyenne, l_s étant généralement une fonction discontinue.

d'où

$$v_{as} = \frac{1}{\left(\sum_{j=1}^n t_j \right)} \sum_{j=1}^n (v_{pj} t_{pj} + v_{0j} t_{0j})$$

$$\text{où } v_{pj} = K_j \cdot q_{pj} \quad \text{et} \quad q_{pj} = \int i_{pj} dt$$

$$v_{0j} = K_j \cdot q_{0j} \quad \text{et} \quad q_{0j} = \int i_{0j} dt$$

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

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

et

$$v_{as} = \frac{1}{\left(\sum_{j=1}^n t_j \right)} \sum_{j=1}^n v_{pj} t_{pj}$$

Ainsi,

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

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

$$v_{as} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{\beta}{\varepsilon \cdot \rho} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{\pi \cdot r_j^2} \right) \sum_{j=1}^n q_{pj} \quad (15)$$

De cette expression, il apparaît que le streamer est d'autant plus rapide que:

- le nombre de branches décroît ;
- et/ou le rayon de ces branches décroît ;
- et/ou sa charge augmente ;
- et/ou l'énergie nécessaire à son déplacement est importante.

La figure 4 donne les variations de la vitesse pour différentes charges globales et différents nombres de branches. Le rayon r_j de ces branches est considéré constant; il est de l'ordre de 5 à 50 μm pour les streamers rapides, d'après les différentes observations expérimentales [5,17,59,60].

En prenant $\epsilon_r=2$, $\beta=10\%$ et une densité $\rho=500\text{kg/m}^3$ nous avons obtenu (fig.4) des variations concordantes avec les observations expérimentales. Ces vitesses sont relativement importantes ; elles correspondent à la propagation d'un streamer positif.

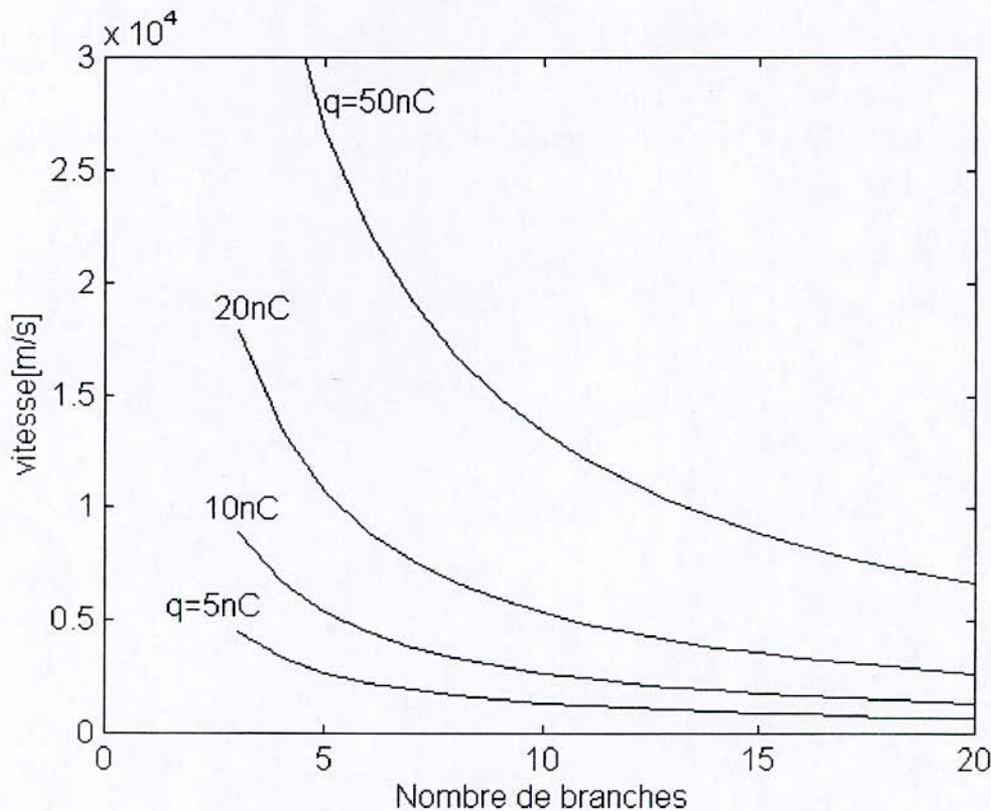


Fig.4 : Variations de la vitesse de propagation en fonction du nombre de branches pour différentes charges, selon le modèle de Beroual. $\epsilon_r=2$, $\rho=500\text{kg/m}^3$, $\beta=10\%$, $r_j=20\mu\text{m}$.

Si on considère que les différentes branches du streamer prennent naissance à partir de la pointe et se propagent simultanément vers le plan (ceci est surtout valable pour les streamers lents en buisson), la longueur du streamer pourra être correctement approximée sous la forme :

$$l_s = \frac{\sum_{j=1}^n l_j}{n}$$

n , étant le nombre de branches.

Et la vitesse v_{as} devient

$$v_{as} = \frac{1}{n \cdot \sum_{j=1}^n t_{pj}} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\beta}{\epsilon \cdot \rho} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{\pi \cdot r_j^2} \right) \cdot q_{pj} t_{pj}$$

Et en supposant que t_p est le même pour chaque saut, cette expression devient :

$$v_{as} = \frac{1}{n^2} \cdot \left(\frac{\beta}{\epsilon \cdot \rho} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{\pi \cdot r_j^2} \right) \sum_{j=1}^n q_{pj} \quad (16)$$

Cette relation donne des valeurs de vitesses allant de quelques dizaines de mètres par seconde si le nombre de branches est important et des vitesses pouvant dépasser le km/s pour un nombre de branches inférieur à 5 (Fig. 5). Ces valeurs sont obtenues pour une densité de 100 kg/m^3 , ce qui correspond à une phase gazeuse caractérisant les streamers négatifs lents.

On peut par ailleurs exprimer v_{as} en fonction de E_{pj} sous la forme :

$$v_{as} = \frac{1}{n \cdot \sum_{j=1}^n t_{pj}} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\beta}{\epsilon \cdot \rho} \right)^{1/2} (2 \cdot \epsilon) E_{pj} t_{pj}$$

La figure 6 donne les variations de la vitesse v_{as} en fonction du champ électrique à la pointe du streamer, en comparaison des variations obtenues d'après le modèle de Devins et al. [6].

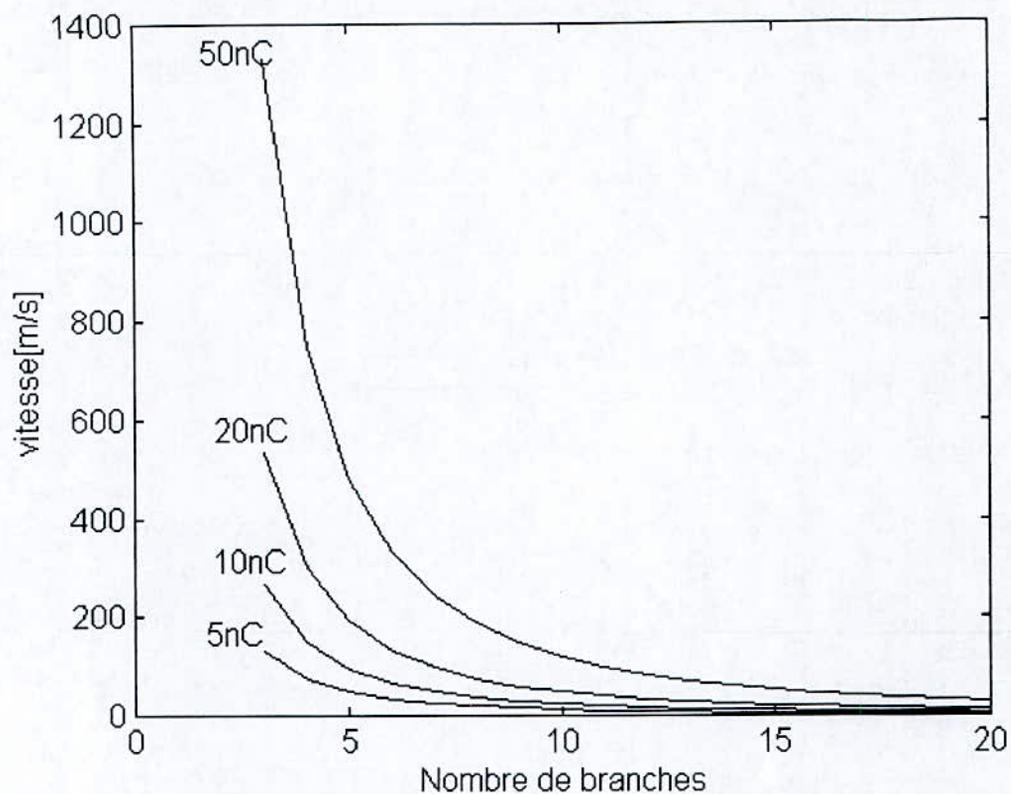


Fig.5 : Variations de la vitesse de propagation en fonction du nombre de branches pour différentes charges, selon le modèle de Beroual. $\epsilon_r=2$, $\rho=100\text{kg/m}^3$, $\beta=10\%$, $r_j=100\mu\text{m}$.

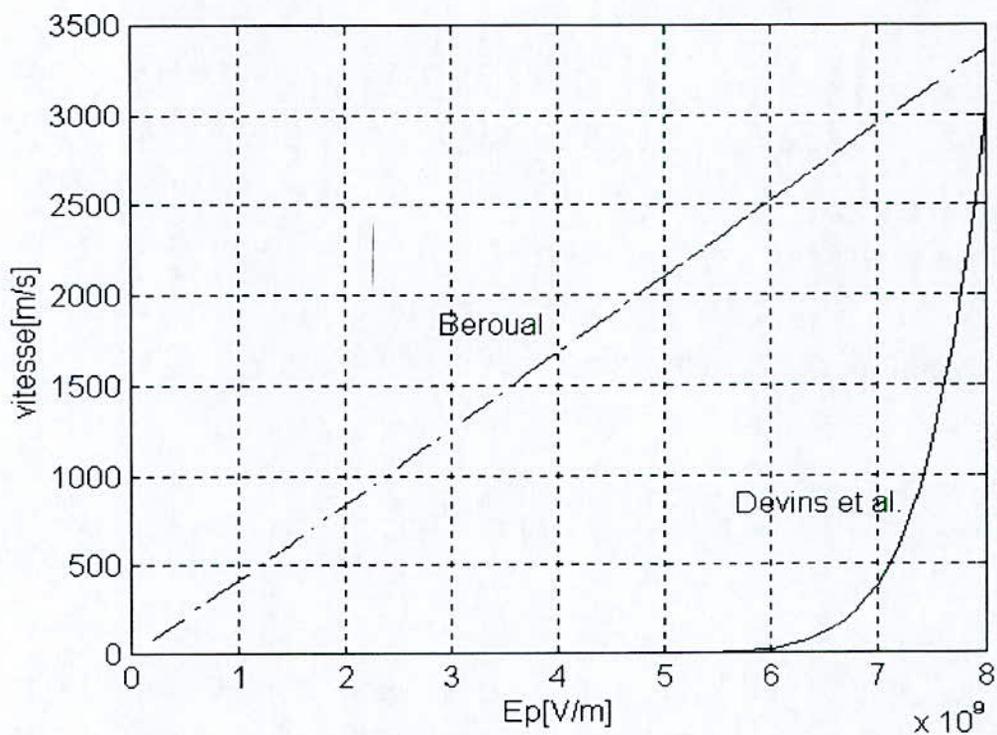


Figure 6: Variations de la vitesse des streamers en fonction du champ appliqué, selon les modèles de Beroual et Devins *et al.*

Conclusion

Les résultats relatifs à la propagation des streamers dans les diélectriques liquides, sont assez nombreux mais aussi diversifiés. Même si certains sont parfois contradictoires, plusieurs avancées ont été cependant réalisées et de nombreuses questions éclaircies.

La forme et la vitesse des streamers semblent dépendre beaucoup plus de l'énergie mise en jeu dans le système que de la polarité des électrodes. La génération des streamers dépend essentiellement de l'intensité du champ à la pointe alors que la propagation dépend du champ d'initiation et du champ moyen.

La classification des liquides ne peut se faire sur la base des masses volumiques des liquides comme l'a montré Beroual. La présence d'additifs spécifiques ou d'halogènes dans le liquide jouent un rôle essentiel dans les mécanismes de propagation des streamers.

Les modèles proposés pour décrire la propagation des streamers, bien qu'inspirés des équations de la physique fondamentale, ne tiennent pas compte de toutes les variantes de streamers rapportés dans la littérature. Les modèles de Watson et Watson et al., ne permettent d'obtenir que des vitesses de l'ordre de quelques dizaine de m/s correspondant à des streamers lents en buisson. Les modèles de Felici et de Devins et al., décrivent des streamers constitués d'une seule branche, ce qui est rarement observé expérimentalement. Le modèle de Beroual est le seul à prévoir les deux modes de propagation, subsonique et supersonique, en établissant une relation entre la forme (nombre de branches) du streamer, son énergie et sa vitesse. La fraction d'énergie ' β ' mise en jeu dans la propagation est estimée entre 5 et 10 %.

CHAPITRE 2

TECHNIQUE EXPERIMENTALE

Le dispositif expérimental est constitué d'une source de tension, d'une cellule d'essai et de systèmes de mesure et d'enregistrement des courants, des charges et des émissions lumineuses (fig.7).

1 - Sources de tensions

Deux types de tensions ont été utilisés dans ce travail: une tension continue et une tension alternative 50Hz. Une autre étude réservée exclusivement à la tension de choc de foudre à été menée antérieurement [61,62].

La source de tension alternative est constituée d'un transformateur élévateur (220V/50kV, 50Hz). La source de tension continue est un générateur (type SAMES) fournissant une tension variable entre 0 et 150 kV. Lors de nos essais, la tension est augmentée ou réduite par paliers d'environ 2kV/s.

La plage de tension d'étude s'étale entre un seuil que nous supposons minimal de génération où, au plus 2 streamers sont générés pendant une heure d'application de la tension, et un seuil maximal au dessus duquel au moins 50% des streamers enregistrés mènent à un claquage.

2- Liquides testés :

Les essais ont porté principalement sur trois liquides: l'huile minérale de transformateur, le tétraester de qualité industrielle et le toluène de qualité spectroscopique.

3- Cellule d'essai:

La cellule d'essai est constituée d'un corps cylindrique en Pyrex de capacité volumique 0.5ℓ (fig.8). Elle est destinée à des essais sous pression atmosphérique. Elle comporte un seul

“hublot” de 10mm de diamètre pour la visualisation, une électrode plane en laiton de 40mm de diamètre bloquée par une barrière en Plexiglas de 1,2mm d'épaisseur et une électrode pointe en laiton, de rayon de courbure $10\mu\text{m}$. L'intervalle inter-électrodes peut être varié entre 1 et 20mm.

Afin d'éviter les déclenchements intempestifs de l'oscilloscope dus aux courants de fuite à travers les parois extérieures de la cellule, nous avons placé sur celle-ci des ailettes en résine isolante afin d'allonger la ligne de fuite et permettre ainsi d'élever le niveau de tension appliqué.

Le liquide est renouvelé systématiquement et le rayon de la pointe est également contrôlé après chaque claquage.

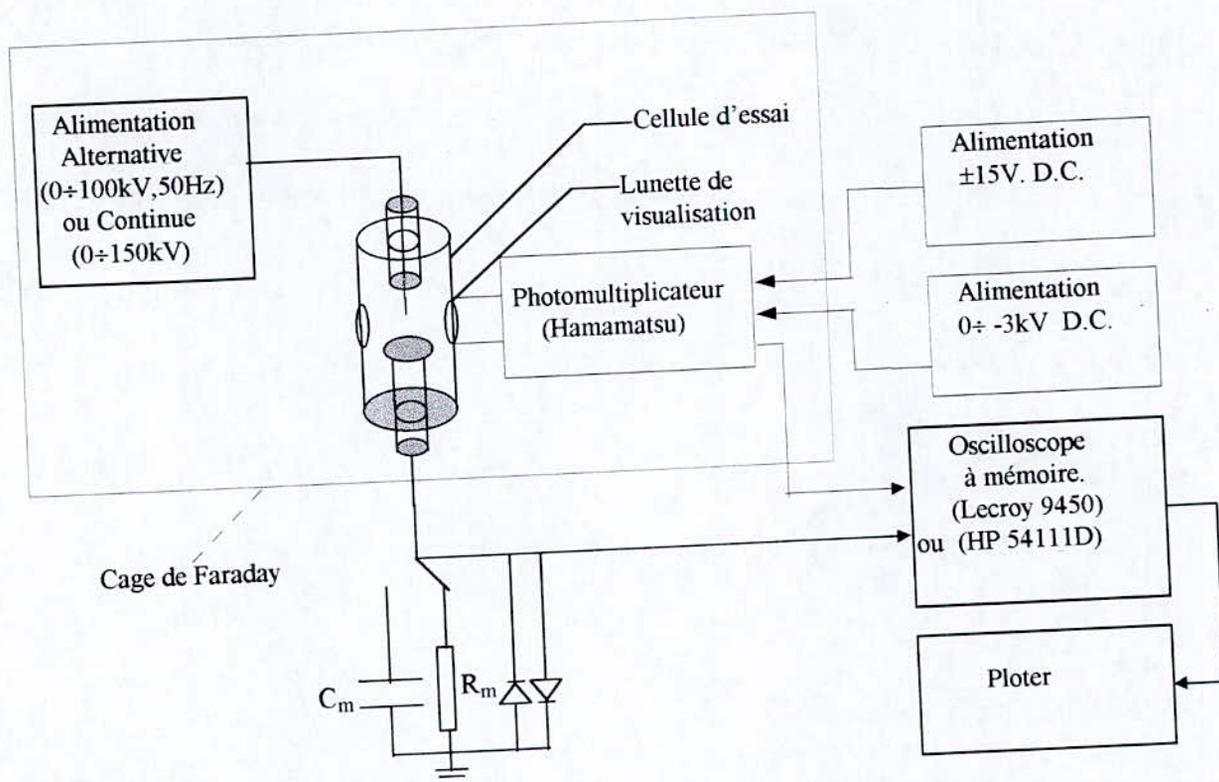


Fig. 7. Dispositif Expérimental

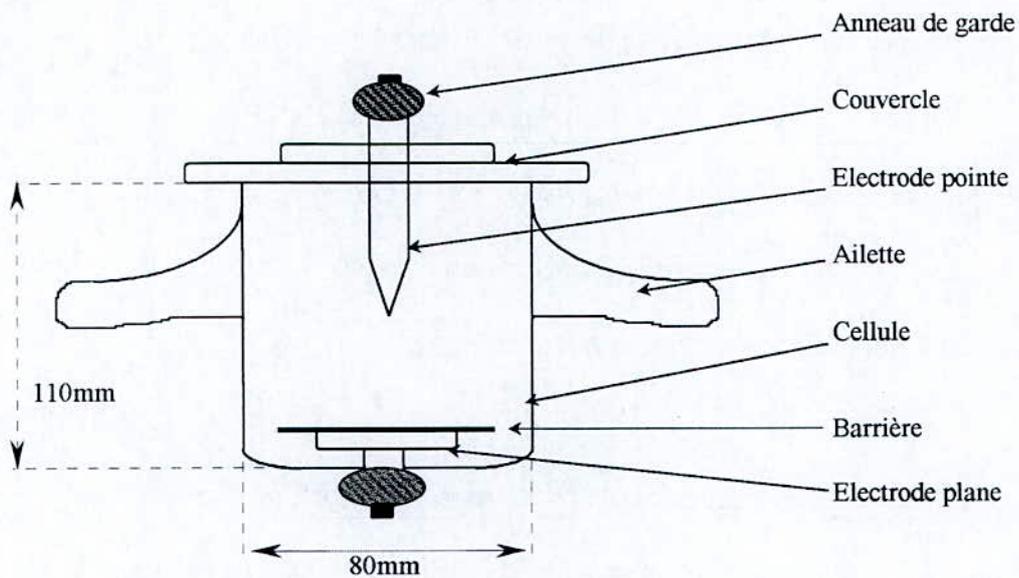


Fig.8. Cellule d'essai

Les électrodes pointes sont obtenues de deux manières:

- Par corrosion électrochimique: ce procédé permet d'obtenir des pointes de rayon inférieur à $1\mu\text{m}$ [62].
- Par usure mécanique à l'aide d'un papier verre très fin appliqué à la pointe fixée sur un tour à faible vitesse de rotation. Cette méthode ne permet pas de réaliser des rayons inférieurs à $1\mu\text{m}$; elle présente néanmoins l'avantage d'obtenir des pointes avec une parfaite conicité, ce qui n'est pas le cas pour la précédente méthode.

Les pointes utilisées dans nos essais sont en laiton de rayon de courbure $10\mu\text{m}$, sauf pour les essais de claquage où elles sont en tungstène.

4- Mesure des courants :

Le courant de streamer est mesuré à travers une résistance R_m de 50Ω , non inductive, placée entre l'électrode plane et la terre, et connectée à l'entrée 50Ω d'un oscilloscope numérique à mémoire (Lecroy 9450, bande passante 350M.Hz). L'entrée de l'oscilloscope est protégée à l'aide de deux diodes rapides (AN4148, 100mA, 4ns, 100V) montées en tête bêche.

Le courant peut également être mesuré directement sur la borne haute tension à l'aide d'un système à photodiodes et fibre optique.

Le niveau d'enclenchement de l'oscilloscope "trigger" est choisi le plus bas possible afin d'enregistrer la moindre manifestation de streamer tout en évitant les enclenchements intempestifs de l'oscilloscope, dus aux courants de décharges partielles à travers les parois externes de la cellule d'essai. Ce niveau est d'autant plus élevé que la distance inter-électrodes et la tension appliquée sont élevés.

Dans la plupart des cas, l'oscilloscope est utilisé en mode 'séquences' enregistrant simultanément les 20, 50 ou 100 premiers événements. Ce nombre est dans la plupart des cas, fixé à vingt, d'une part, par le fait que tous les types de courant susceptibles de se manifester à un niveau de tension donné, sont enregistrés. D'autre part, en prenant un nombre supérieur, les signaux enregistrés peuvent être tronqués en partie et perdre en résolution.

5- Mesure de la charge:

La charge globale correspondant aux streamers à été mesurée par deux méthodes différentes :

- Par intégration du signal de courant ($Q = \int I . dt$) à l'aide d'un oscilloscope numérique (H.P 54111D, 250MHz) doté de la fonction d'intégration.

- Par la mesure de la tension U aux bornes d'une capacité variable C_m placée sur le conducteur de terre, la charge serait donc le produit $C_m \cdot U$.

6- Détection de la lumière émise :

La lumière émise par le streamer est détectée à l'aide d'un photomultiplicateur (Hamamatsu) muni d'une grille de photodiodes très sensibles, polarisée par un générateur continu $\pm 15V$; le signal électrique ainsi obtenu est amplifié à l'aide d'un générateur haute tension continue négative variable ($0 \div -3kV$). L'amplification maximale du signal est obtenue aux alentours de 1,8 kV lorsque la grille de photodiodes est placée à environ 10 cm de la source émettrice de lumière (le streamer). Au delà de cette tension, il y a saturation de l'appareil.

Dans le souci de capter en totalité la lumière émise, nous avons enduit, de l'extérieur, la cellule d'essai par une laque blanche et laissé une fenêtre de mêmes dimensions que la grille de photodiodes ($42 \times 4,5 \text{mm}^2$). Ces deux dernières sont rapprochées le plus possible l'une de l'autre afin d'obtenir un maximum de sensibilité lumineuse de l'appareillage utilisé.

7- Calibrage de la lumière :

Les travaux menés jusqu'à présent sur l'étude de l'émission lumineuse des streamers donnaient cette grandeur en unités arbitraires. Afin d'avoir une idée sur l'amplitude de cette grandeur nous avons procédé à un étalonnage de l'appareil en unités lumineuses équivalentes aux grandeurs électriques réellement mesurées. La grille de photodiodes joue le rôle de cellule photométrique mesurant un éclairage émis par la source lumineuse représentée par le streamer.

Le calibrage du dispositif de mesure a été fait en éclairant la grille de photodiodes par une source de lumière connue (néons) émettant un flux lumineux F_x , placée face à la grille de photodiodes à une distance d_G . En appliquant la relation : $E_c = \frac{F_x}{4.\pi.d_G^2}$, on obtient un

éclairage E de 68,18 Lux correspondant à une tension de 9.8mV mesurée à l'oscilloscope.

Le système étant linéaire, on a donc le calibrage suivant : $e_c = 7\text{Lux/mV}$.

En considérant le streamer comme source de lumière concentrée sur l'axe pointe-plan, la distance d'_G entre cet axe et la grille de photodiodes étant maintenue fixe à 110 mm, le flux unitaire sur cet axe serait: $f_x = 4.\pi.e_c.d_G'^2 = 1\text{Lum / mV}$.

Le flux lumineux étant supposé uniformément réparti autour du streamer, du fait de l'axi-symétrie du système, on peut déterminer l'intensité lumineuse: $i_e = \frac{f_x}{4.\pi}$ et on a l'équivalence: $i_e = 0,027\text{Cd / mV}$.

Chapitre 3

ETUDE SOUS TENSION ALTERNATIVE.

INTRODUCTION :

L'évaluation de la vitesse des streamers et de leur mode de propagation ont été rendues aisées grâce aux corrélations établies avec les courants et la lumière qu'ils émettent [5,7,17,18,55,63-67]. Ainsi, ce chapitre portera essentiellement sur l'étude des courants (charges) et émissions lumineuses des streamers dans l'huile minérale de transformateur, le tétraester et le toluène, soumis à un champ électrique divergent sous tension alternative 50Hz.

Nous allons tenter, dans ce qui suit, d'analyser les différents types de courants susceptibles de se manifester sous chaque alternance ainsi que leur fréquence d'apparition en fonction de la tension appliquée et de la géométrie des électrodes.

1- Fréquence d'apparition des streamers:

Dans les trois liquides considérés, la fréquence d'apparition des streamers augmente avec le niveau de tension appliqué (fig. 9, 10 et 11) et, pour un niveau de tension donné, elle diminue lorsque la distance inter-électrodes augmente. Lorsque cette fréquence d'apparition avoisine les 100 streamers/min, des claquages apparaissent dans l'huile minérale et le tétraester alors que dans le toluène, les claquages ne sont observés que lorsque l'on atteint les 200 streamers/min.

Dans l'huile minérale et le tétraester, les streamers positifs apparaissent plus tôt que les streamers négatifs. Leurs courants, assez reproductibles (fig.12), sont nettement supérieurs en amplitude et en durée. Les rares streamers négatifs enregistrés dans l'huile minérale sont peu énergétiques et apparaissent à des niveaux de tension proches du seuil de claquage. Dans le toluène, ce sont plutôt les streamers négatifs qui apparaissent en premier et leur proportion est toujours supérieure à celle des streamers positifs.

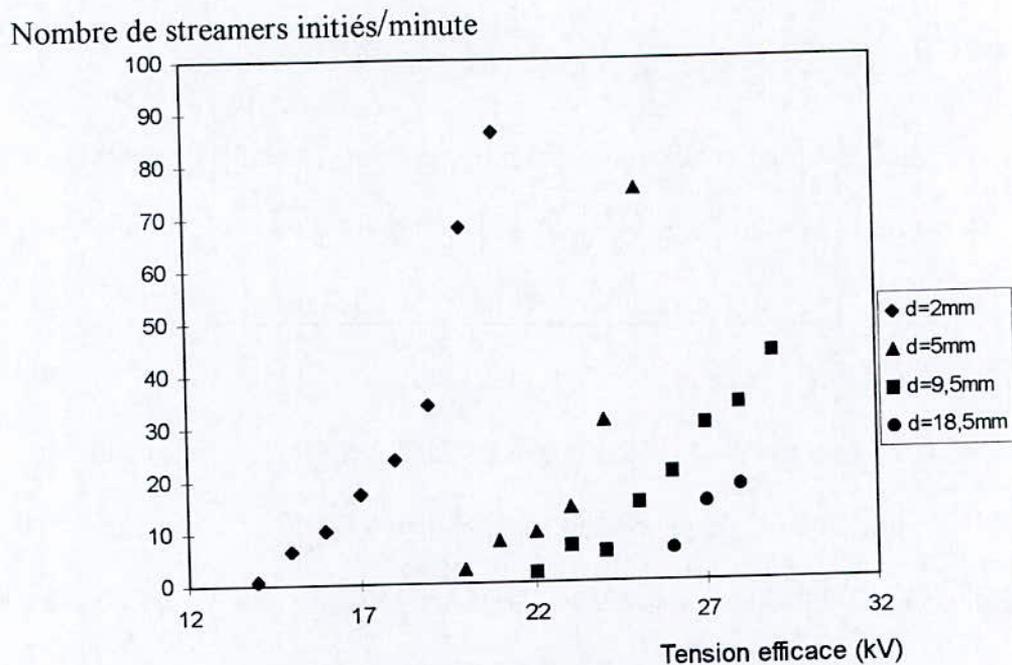


Fig. 9 : Variations du nombre de streamers initiés par minute en fonction de la tension appliquée dans l'huile minérale pour différentes distances inter-électrodes, $r_p=10\mu\text{m}$.

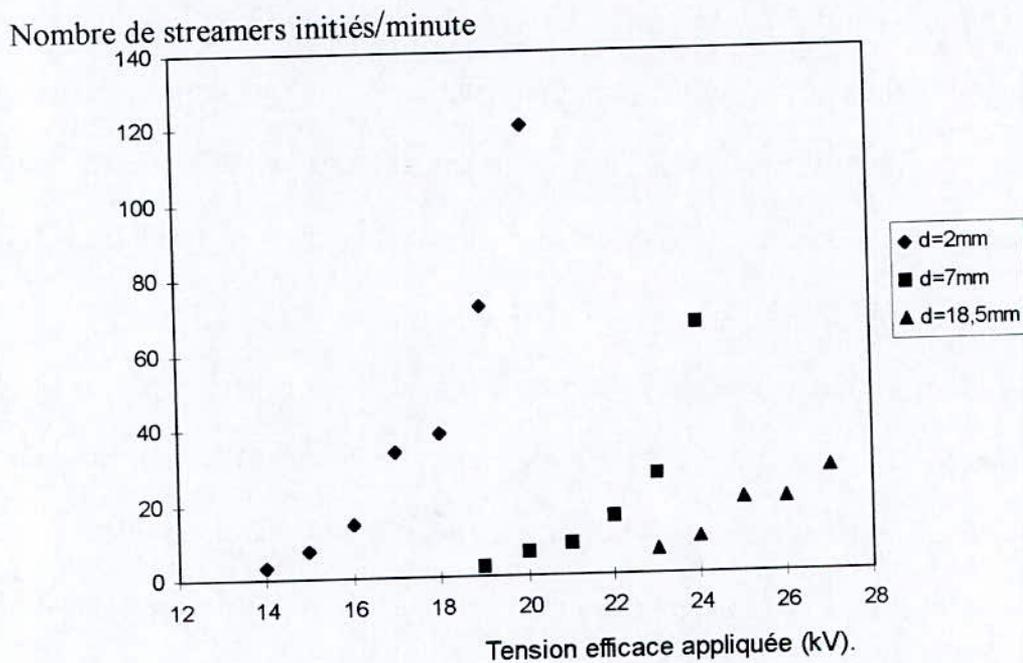


Fig.10 : Variations du nombre de streamers initiés par minute en fonction de la tension appliquée dans le tetraester pour différentes distances inter-électrodes, $r_p=10\mu\text{m}$.

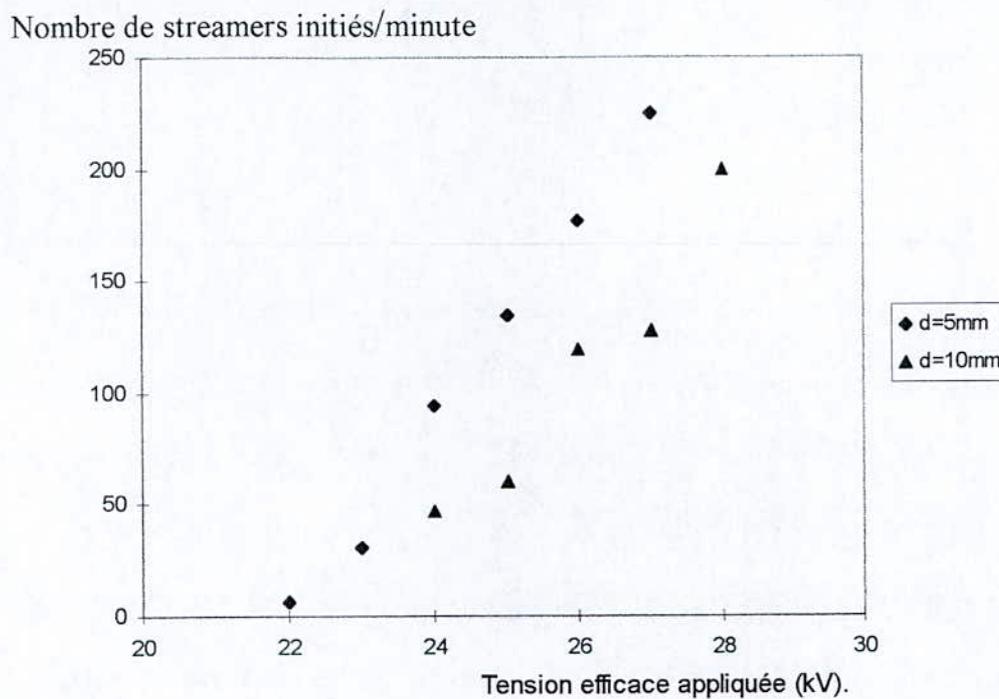


Fig.11 : Variations du nombre de streamers initiés par minute en fonction de la tension appliquée dans le toluène pour différentes distances inter-électrodes, $r_p=10\mu\text{m}$.

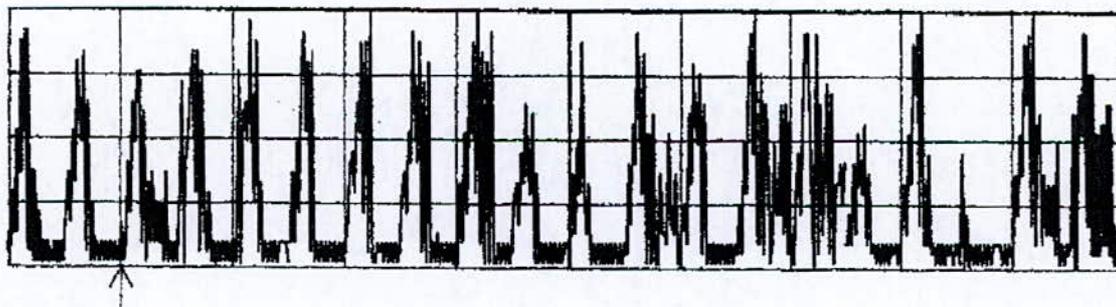


Fig.12 : Enregistrement d'une série de 20 événements successifs dans l'huile minérale $d=5\text{mm}$, $U=22\text{kV}$, 4.5mA/div .

2- Courants et Charges

2.1- Forme des courants et aspect statistique:

Selon l'amplitude de la tension appliquée, différentes formes de courant peuvent être observées. Celles ci apparaissent sous les deux alternances (positive et négative) lorsque la tension dépasse une certaine valeur seuil correspondant à l'initiation des streamers. Cependant, excepté dans le toluène, l'apparition des streamers positifs est plus fréquente que celles des streamers négatifs dans les autres liquides. Les figures 13,14 et 15 montrent les différentes formes de courant et émissions lumineuses associées, observées dans l'huile minérale sous la même tension et dans la même géométrie des électrodes. Ces signaux sont similaires à ceux observés sous tension impulsionnelle [1].

Les courants de type 'a' sont les plus observés; ils sont caractérisés par une composante continue qui augmente dans le temps jusqu'à une valeur maximale correspondant à leur arrivée sur le plan [1,15,23,68]. Sur cette composante continue sont superposés des pics de courant dont l'amplitude diminue avec l'accroissement de la tension appliquée. Le temps de décroissance du courant correspondant à l'extinction du streamer, tend à augmenter avec la tension.

Les courants de type 'b' apparaissent en faible proportion sous l'alternance négative. Ils sont seulement observés aux fortes tensions, au delà du seuil de claquage, dans le cas de l'huile minérale.

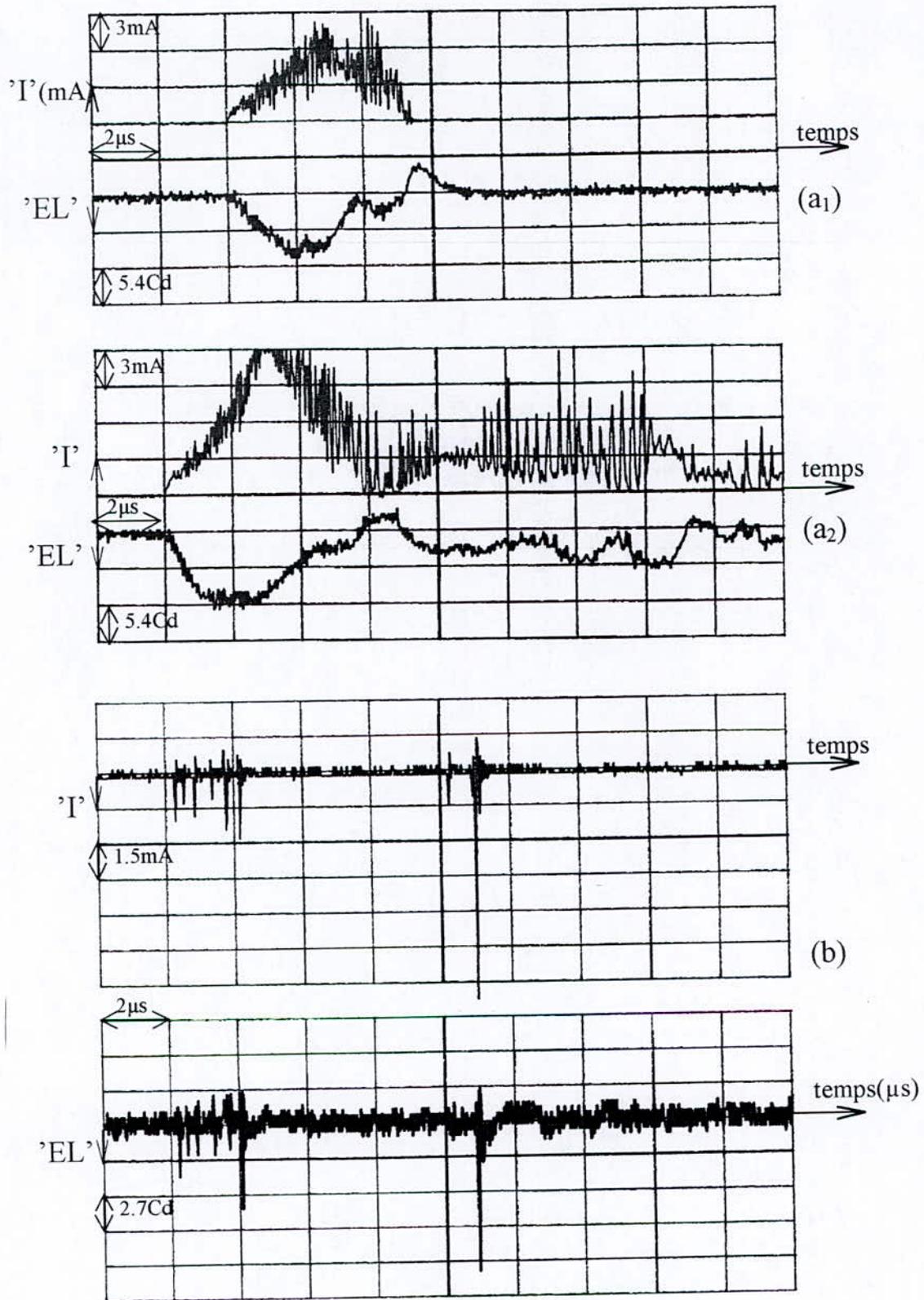


Figure 13 : Courants typiques 'I' et émissions lumineuses correspondantes 'EL' observés dans l'huile minérale ; (a₁) et (a₂) positifs, (b) négatifs, $d=5\text{mm}$, $U=24\text{kV}$, $r_p=10\mu\text{m}$.

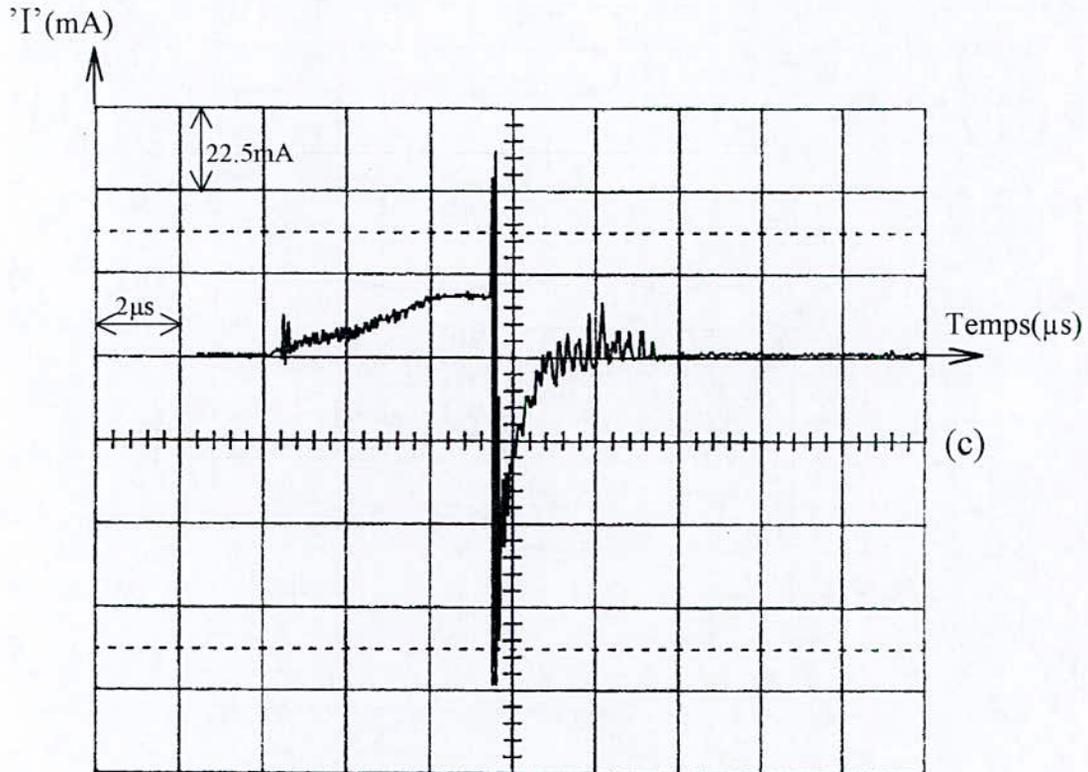


Fig.14 : Transition très rapide d'un courant positif dans l'huile minérale.
 - Mêmes conditions que la fig.13 : $d=5\text{mm}$; $U=24\text{kV}$.
 - Echelle : $2\mu\text{s}/\text{div}$ pour le temps et $22.5\text{mA}/\text{div}$ pour 'I'.

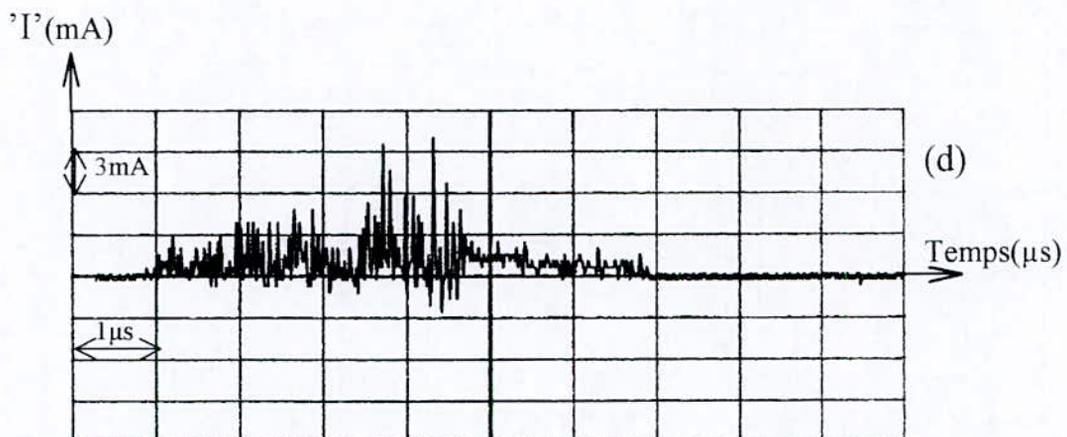


Fig.15 : Courant positif rare, observé dans l'huile minérale.
 - Mêmes conditions que la fig.13 : $d=5\text{mm}$, $U=20\text{kV}$.
 - Echelle : $1\mu\text{s}/\text{div}$ pour le temps et $3\text{mA}/\text{div}$ pour 'I'.

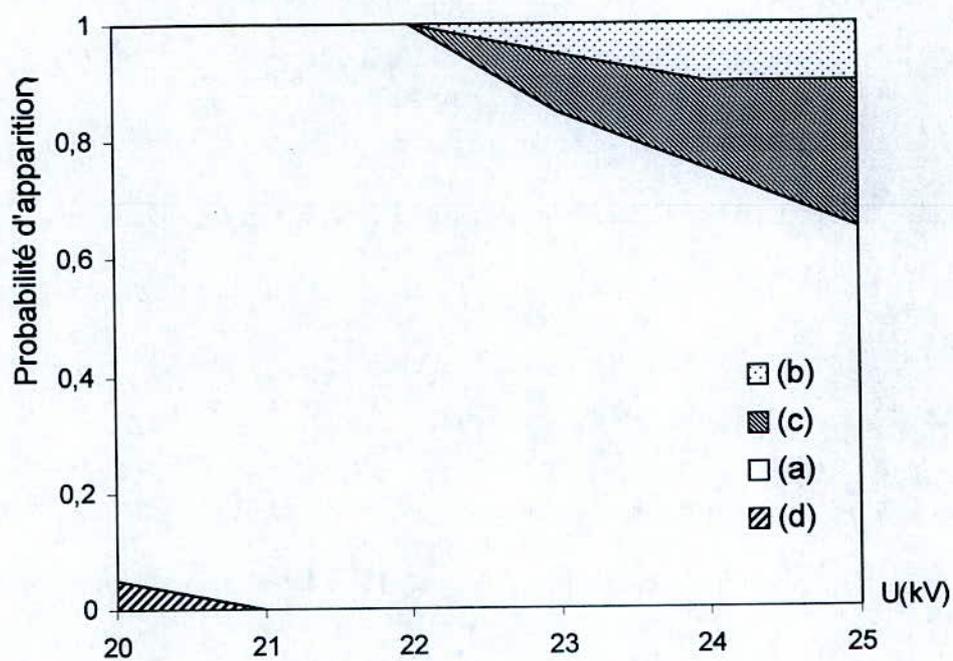


Figure 16 : Probabilité d'apparition de chacun des types de courant dans l'huile minérale en fonction du niveau de tension appliquée. (moyenne de 3 séries de 20 événements successifs).
 $d=5\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$.

Les courants de type 'a' peuvent transiter vers un courant de type 'c', constitué d'un ou deux forts pics de courant positifs (3 à 4 fois la valeur maximale de la composante continue) puis s'inverse brusquement sous forme de trois ou quatre pics négatifs de très forte amplitude (10 fois la valeur maximale de la composante continue). La figure 14 montre une transition à ce type de courant, 1.5 μ s après l'arrivée du streamer de type 'a' sur le plan. Le temps nécessaire à cette transition diminue avec l'accroissement de la tension. Ce type de courant devrait correspondre à des événements très rapides tels ceux observés par Torshin [17] et Lundgaard et al. [37].

Aux faibles valeurs de tension, nous avons enregistré des courants de type 'd' (figure 15), similaires à ceux caractérisant les streamers négatifs, dont la fréquence est cependant plus importante et plus régulière. Leur durée est relativement courte et les streamers correspondants ne devraient pas atteindre l'électrode plane.

La probabilité d'apparition de chacun de ces types de streamers dépend de la tension appliquée et des conditions intrinsèques du milieu (charge d'espace, particules préexistantes et bulles générées par le streamer précédent ...). Pour un même niveau de tension appliquée, ces quatre types de courant peuvent être observés à des proportions différentes (fig. 16).

2.2- Amplitude des courants :

L'amplitude de la composante continue du courant des streamers positifs dans l'huile minérale (fig. 17) augmente régulièrement avec la tension appliquée pour atteindre un seuil à partir duquel on observe une nette diminution de la pente. Ce seuil se situe à $U=22\text{kV}$ pour $d=5\text{mm}$. Il correspond au niveau de tension au delà duquel des streamers suivis de claquages ont été observés.

Dans le tetraester, l'amplitude maximale de la composante continue évolue de façon uniforme en fonction de la tension jusqu'au seuil de claquage, sans changement de pente (fig.18).

Dans le toluène, les courants positifs sont constitués de pics très élevés par rapport à l'amplitude de la composante continue sur laquelle ils se superposent. L'estimation de la vitesse à partir du temps correspondant à l'amplitude maximale de cette composante continue est plus difficile dans ce liquide, comparé à l'huile minérale et au tetraester, d'autant plus qu'elle est parfois précédée par des pics brefs relativement espacés, semblables à ceux caractérisant les streamers lents. Ceci n'a pas été observé dans les deux autres liquides.

Les valeurs de courant relevées dans la figure 19 correspondent à la valeur maximale de la composante continue. L'amplitude des pics survenant juste après cette valeur maximale peut atteindre trois ou quatre fois cette dernière. La charge correspondante serait alors très élevée.

L'amplitude de la composante continue des courants positifs est plus importante dans le tetraester que dans l'huile minérale et le toluène (fig.20). Dans ce dernier, ce sont plutôt les pics de courant qui sont nettement plus importants que la composante continue.

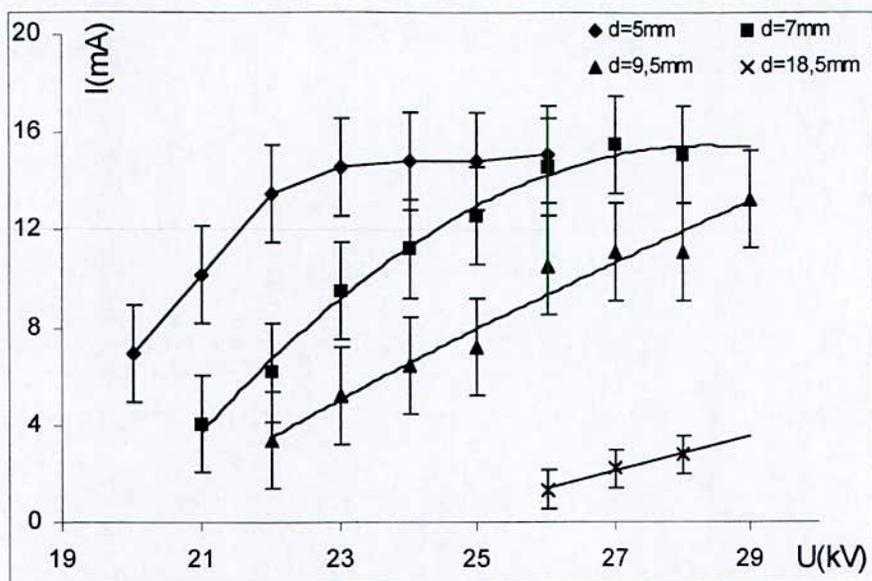


Fig.17 : Courants de streamers positifs en fonction du niveau de tension appliquée dans l'huile minérale pour différentes distances inter-électrodes.

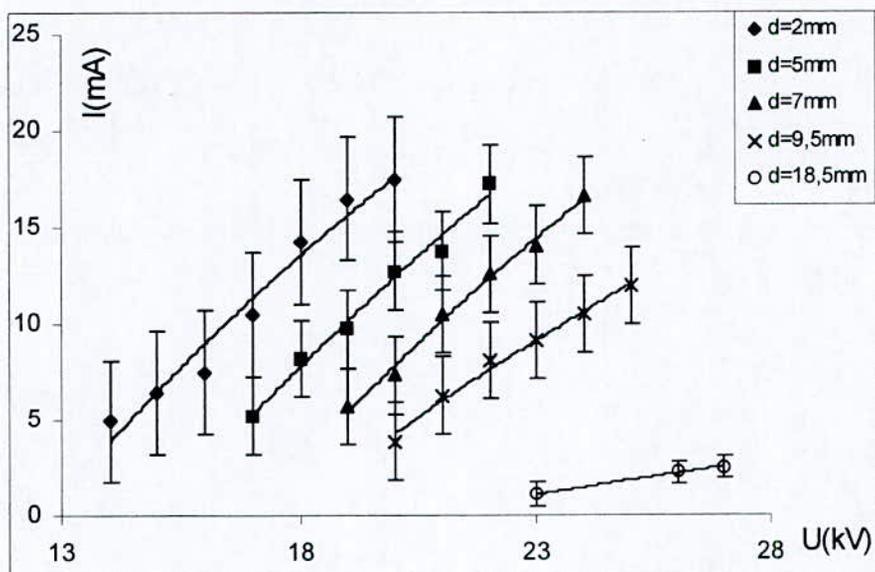


Fig.18 : Influence du niveau de tension appliquée sur les courants de streamers positifs dans le tetraester pour différentes distances inter-électrodes.

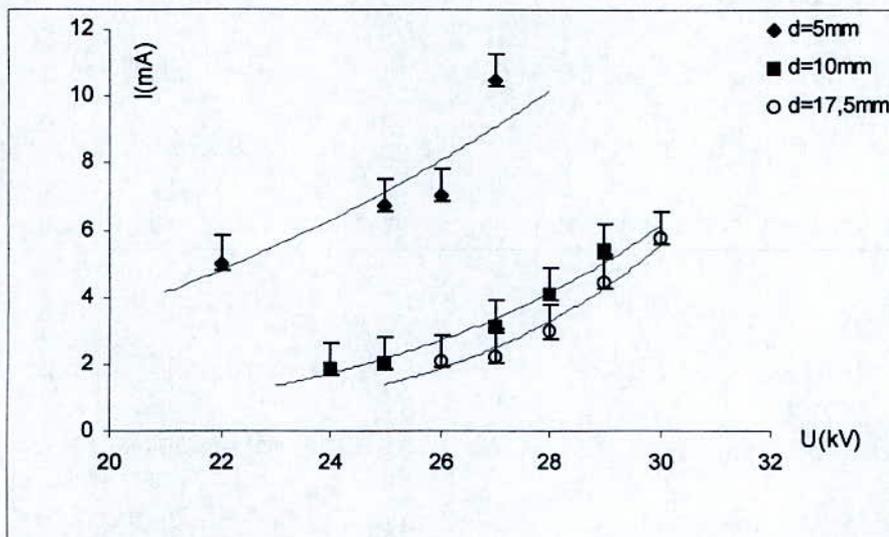


Fig.19 : Courants de streamers positifs en fonction du niveau de tension appliquée dans le toluène pour différentes distances inter-électrodes.

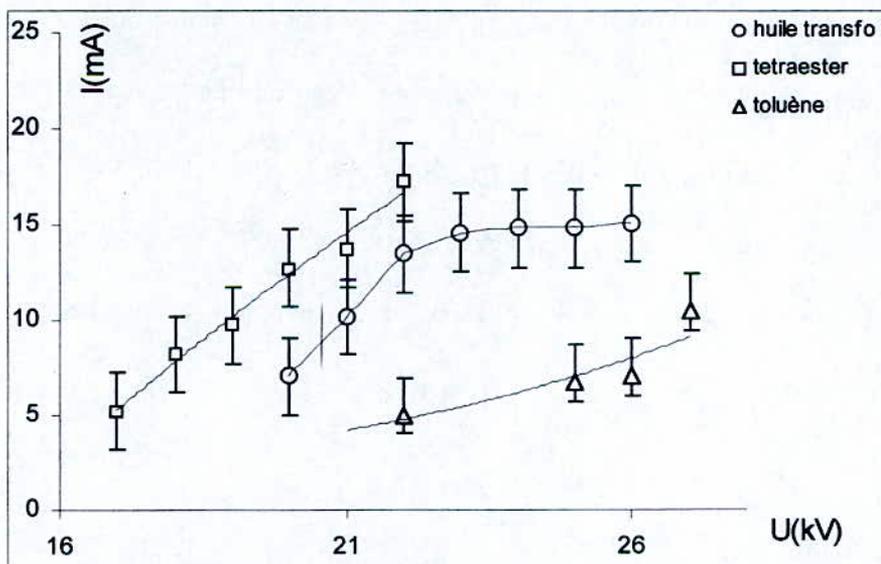


Fig.20 : Courants de streamers positifs en fonction du niveau de tension appliquée dans les trois liquides ($d=5\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$)

2.3- Charges :

La charge des streamers positifs augmente uniformément dans le temps jusqu'à sa valeur maximale (fig.21). Ceci n'est pas le cas pour les streamers négatifs où la charge évolue sous forme de sauts correspondant à chaque impulsion de courant.

Il nous a été difficile d'étudier les variations de la charge des streamers négatifs en fonction de la tension appliquée du fait de leur enregistrement sur une plage de tension très réduite. Cependant, la charge relative à ces streamers est nettement inférieure à celle des streamers positifs. La variation de cette dernière dans l'huile minérale augmente avec le niveau de tension appliqué jusqu'à un certain seuil où elle présente une tendance à la saturation tel qu'observé sur les courants (fig.22). Ce seuil correspond également au niveau de tension à partir duquel des claquages du liquide sont observés. Ceci n'est pas observé dans le tétraester où la charge varie uniformément jusqu'au claquage du liquide (fig.23).

Contrairement à la composante continue du courant, la charge des streamers positifs dans le toluène est nettement plus importante que dans le tétraester et l'huile minérale (fig.24 et 25).

Les charges dans l'huile minérale et le tétraester sont de même ordre de grandeur. Cependant, les seuils de claquage et d'initiation dans le tétraester surviennent prématurément par rapport à l'huile minérale.

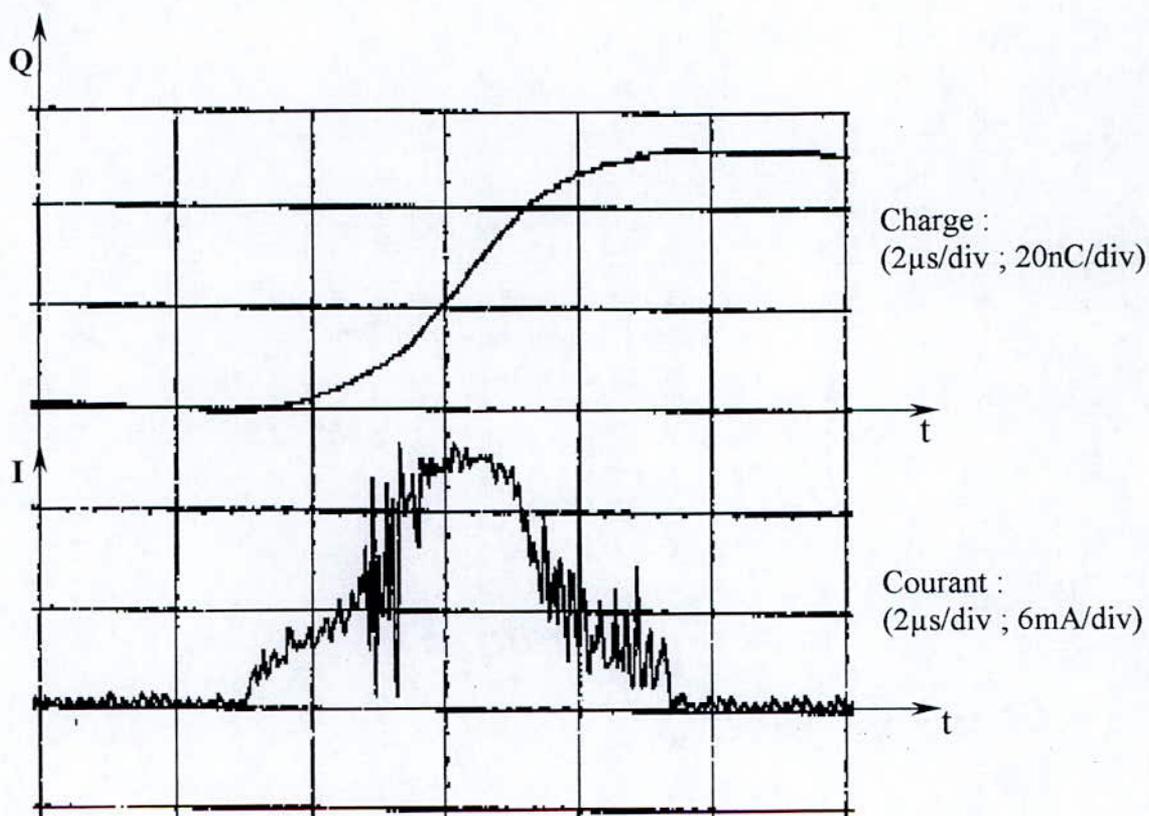


Fig.21 : courant et charge correspondante d'un streamer positif dans l'huile minérale, $d=5\text{mm}$, $U=22\text{kV}$. (enregistrement sur HP 54111D, 250MHz).

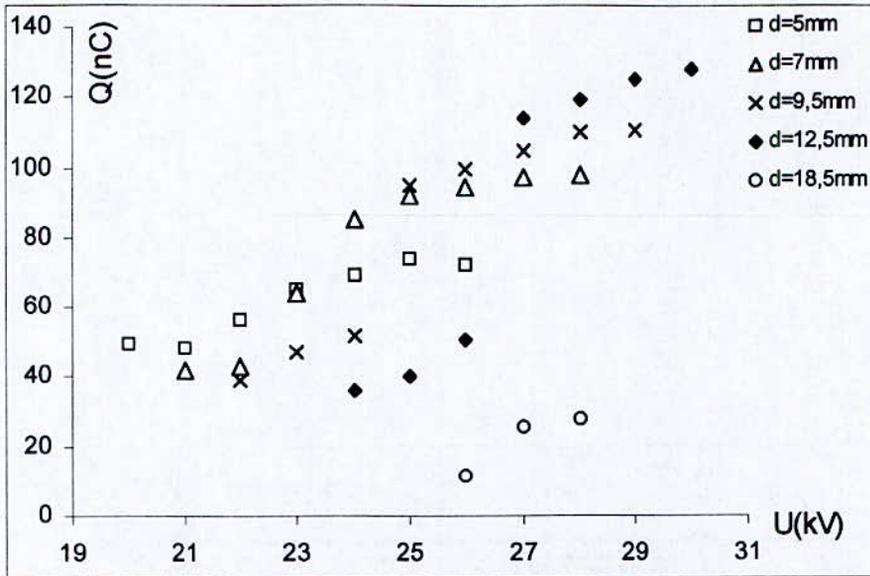


Fig.22 : Charge moyenne des streamers positifs en fonction du niveau de tension appliquée dans l'huile minérale de transformateur.

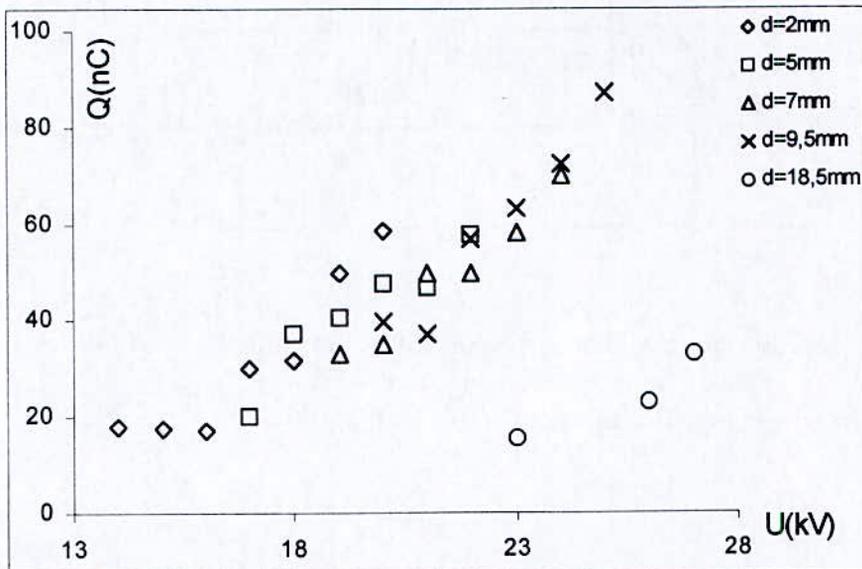


Fig.23 : Charge moyenne des streamers positifs en fonction du niveau de tension appliquée dans le tetraester.

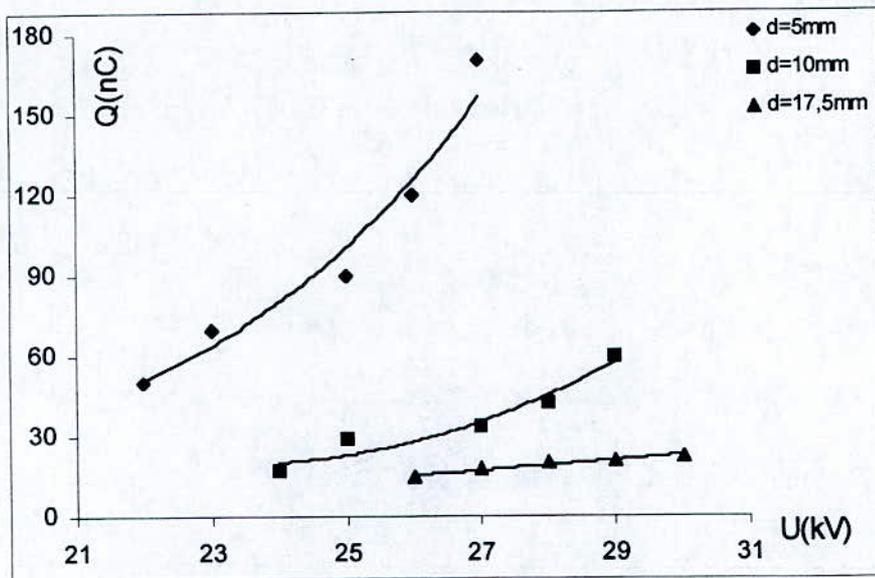


Fig.24 : Charge moyenne des streamers positifs en fonction du niveau de tension appliquée dans le toluène.

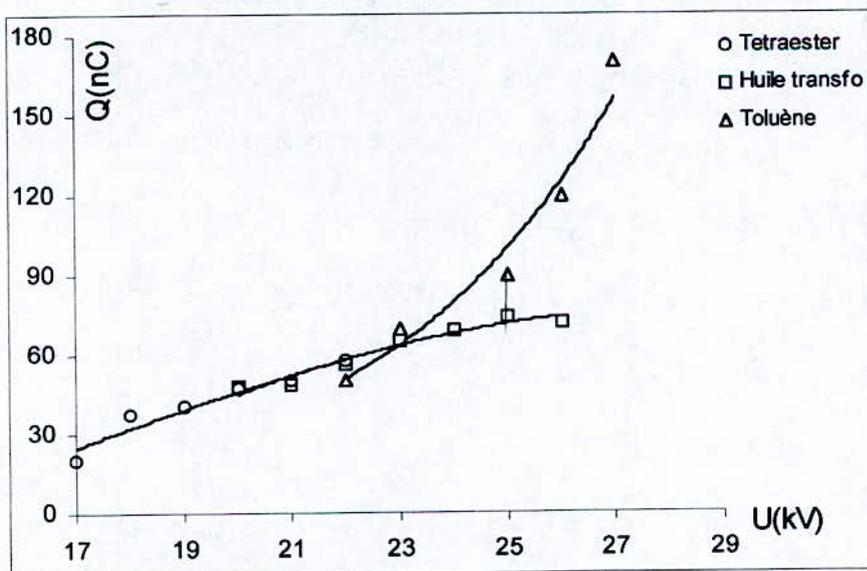


Fig.25 : Charge des streamers dans les trois liquides en fonction du niveau de tension appliquée. ($d=5\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$)

3- Influence du niveau de tension appliqué :

Lorsque la tension est augmentée, l'amplitude de la composante continue des courants positifs augment jusqu'à une valeur maximale qui est de l'ordre de 2mA pour la distance $d=9.5\text{mm}$ et un rayon de pointe de $10\mu\text{m}$. Cette valeur maximale est atteinte à une tension appliquée de 27kV. Au delà de ce niveau de tension, la composante continue du courant du streamer reste inchangée, mais ce dernier est souvent suivi par un claquage du diélectrique, caractérisé par un courant bref et de forte amplitude (fig.26, $U=29\text{kV}$).

L'amplitude des pics se superposant sur la composante continue du courant, durant sa montée, diminue avec le niveau de tension appliqué. Par contre, l'amplitude et la durée des pics accompagnant sa décroissance, augmentent avec cette dernière. La figure 27 montre un type de courant observé dans l'huile minérale lorsque la tension est suffisamment élevée ($U=28\text{kV}$ à $d=12\text{mm}$). Après son arrivée sur le plan, le streamer tend à se maintenir en générant un courant sous forme de pics semblables à ceux caractérisant les streamers négatifs lents. A priori, cela semble correspondre à un streamer positif filamentaire relayé par un streamer en buisson. Ce phénomène est d'autant plus observé et plus long que la distance inter-électrodes est faible.

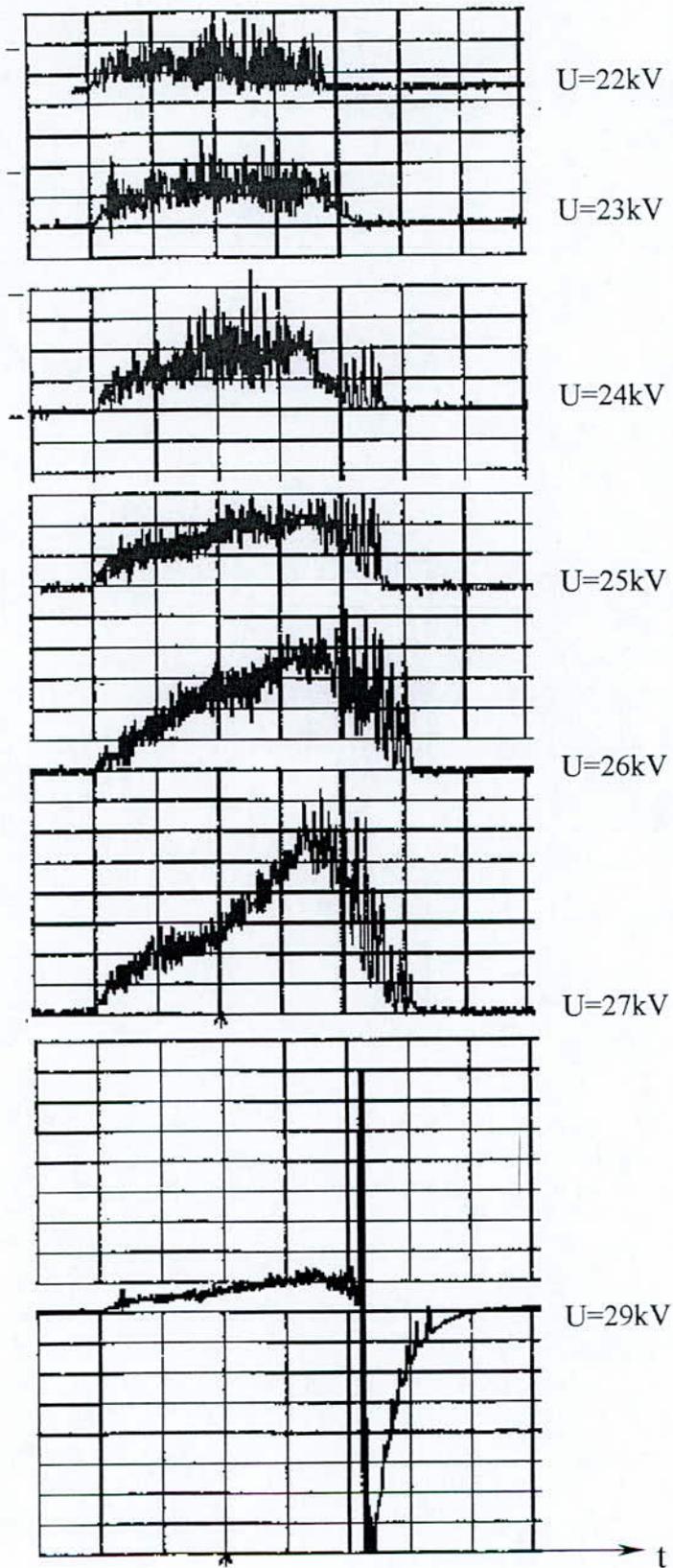


Fig.26: Evolution des courants typiques de streamers positifs en fonction du niveau de tension appliqué dans l'huile minérale. $d=9.5\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$.
 $2\mu\text{s}/\text{div}$; $0.3\text{mA}/\text{div}$ (sauf dernier signal : $1.5\text{mA}/\text{div}$)

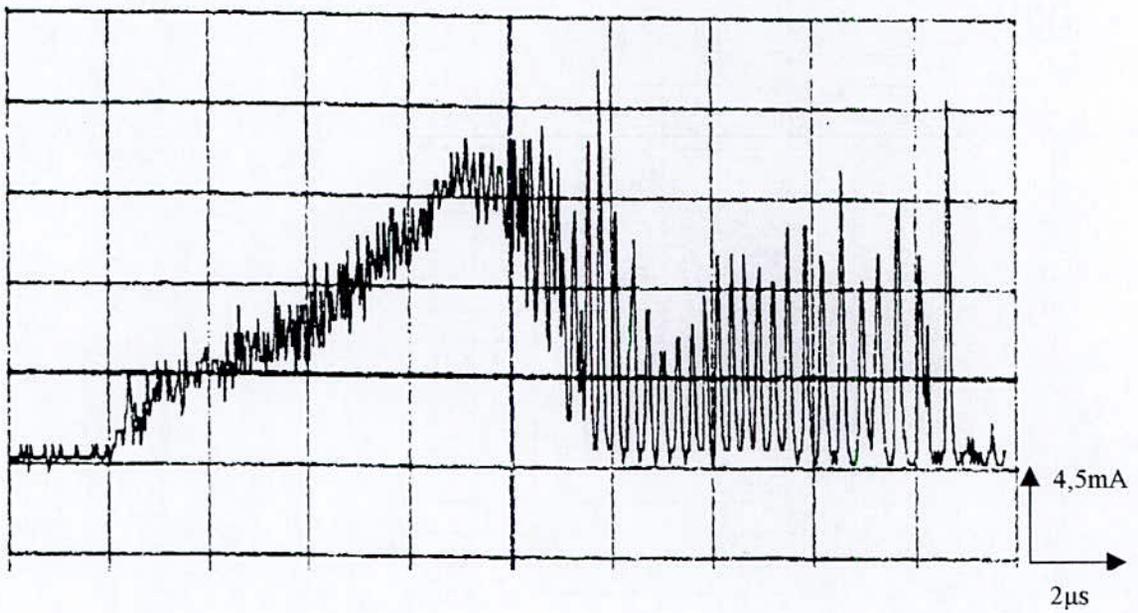


Fig.27: Courant de streamer positif dans l'huile minérale, suivi d'un train d'impulsions similaires à celles observées sous l'alternance négative. $U=28\text{kV}$, $d=12,5\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$.

4- Influence de la distance inter-électrodes (géométrie) :

La distance inter-électrodes ainsi que le rayon de courbure de la pointe et le diamètre de l'électrode plane sont les paramètres géométriques du système les plus influents [2,16,35,61,69]. Dans notre étude, nous nous sommes limités à l'influence du premier paramètre.

Les courants positifs correspondant aux streamers n'arrivant pas au plan sont d'autant plus fréquents que la distance inter-électrodes est grande (fig.28.a) ; ils sont observés à des distances $d > 10\text{mm}$ pour $r_p = 10\mu\text{m}$. Ces courants sont constitués de pics discrets sans composante continue. Leur durée, de l'ordre de $5\mu\text{s}$ n'est pas suffisante pour permettre au streamer correspondant d'arriver au plan (Il faudrait au moins $9\mu\text{s}$ pour un streamer positif de vitesse moyenne 2km/s pour parcourir une distance de 18mm dans l'huile minérale). La figure 28.b montre un courant obtenu dans les mêmes conditions que le précédent, dont la durée est suffisante pour permettre au streamer d'atteindre le plan. Il évolue en deux étapes distinctes, une première où on observe des pics assez importants et une seconde étape où ces pics sont inexistantes. Ce type de courant devrait correspondre à un streamer positif en buisson suivi par un autre filamentaire tel qu'observé par Beroual [19] dans le cyclohexane sous créneau de tension.

Il est possible de prédire si un streamer positif devrait atteindre le plan ou non, selon la durée du courant correspondant et selon que ce courant présente ou non une composante continue. Cependant, les énergies dissipées dans l'une ou l'autre forme de streamer sont du même ordre de grandeur (0.5nJ). Ceci va en faveur du fait que l'initiation d'un streamer dépend essentiellement de l'intensité du champ à la pointe et, son aboutissement ou non sur le plan dépend du champ qui règne à sa tête vive.

Aux faibles distances ($d < 10\text{mm}$), lorsqu'un claquage survient, il est suivi par d'autres et la décharge se maintient. Ceci n'est pas le cas pour les distances relativement plus longues où un claquage n'est pas systématiquement suivi par d'autres. Il peut y avoir plusieurs streamers entre deux claquages. Dans ce cas la décharge se maintient lorsque la probabilité de claquage dépasse 50% (fig.29). Nous appelons claquage toute décharge rapide de forte énergie sans pour autant qu'il y ait formation d'arc électrique.

La tension seuil d'apparition ' U_{ap} ' des streamers est également affectée par la distance inter-électrodes ' d ' (fig.30). Sa variation en fonction de ' d ' n'est pas linéaire.

Nous avons établi, à partir des résultats expérimentaux, une relation empirique, sous la forme:

$$U_{ap} = K_{\ell} \cdot \ln(d) + U_0$$

où U_0 est la tension seuil extrapolée à $d=0$ et K_{ℓ} une constante caractéristique de chaque liquide. Elle est égale à 4 pour le tetraester, 4.4 pour le toluène et 5.2 pour l'huile minérale.

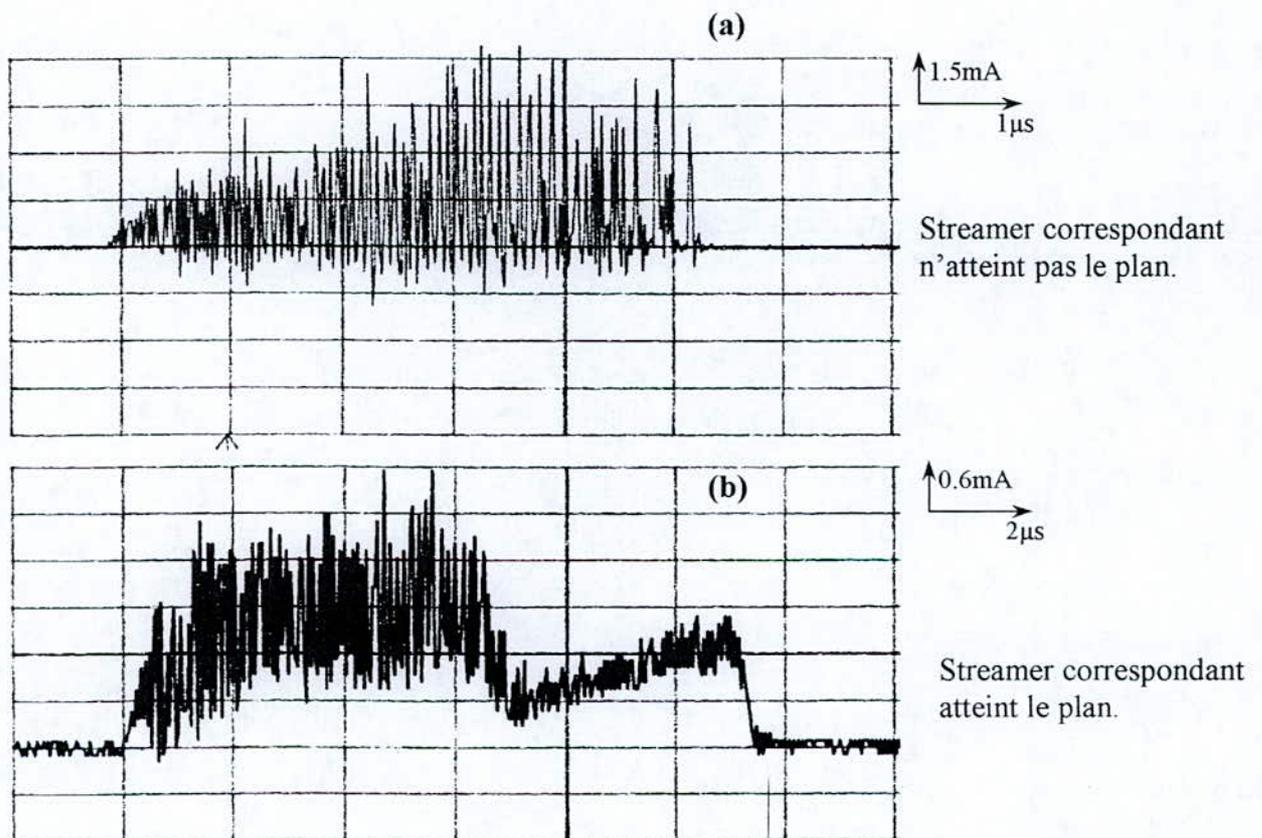


Figure 28 : Courants de streamers obtenus dans les mêmes conditions expérimentales en longues distances dans l'huile minérale, $d=18.5\text{mm}$, $U=28\text{kV}$, $r_p=10\mu\text{m}$

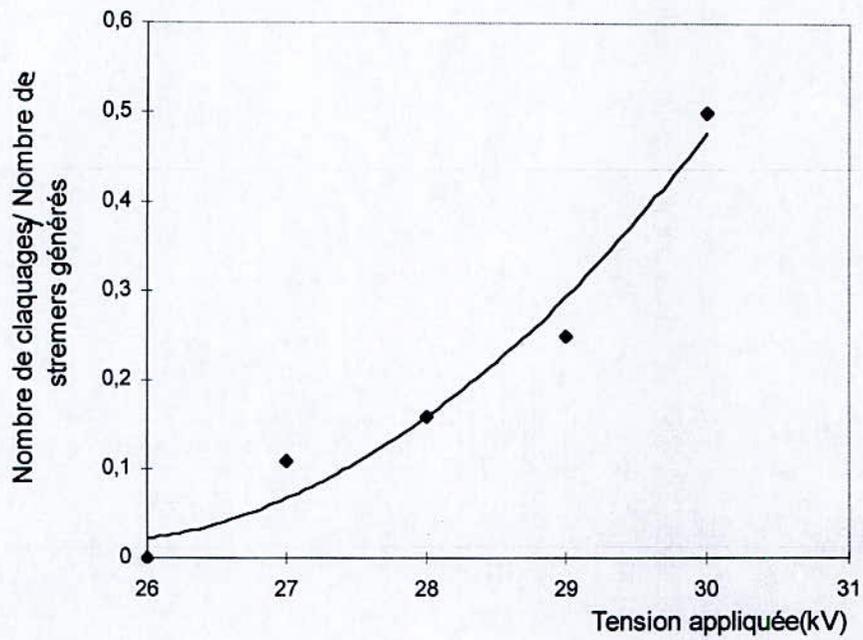


Fig.29 : Probabilité de claquage dans l'huile minérale sous tension alternative, $d=12.5\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$.

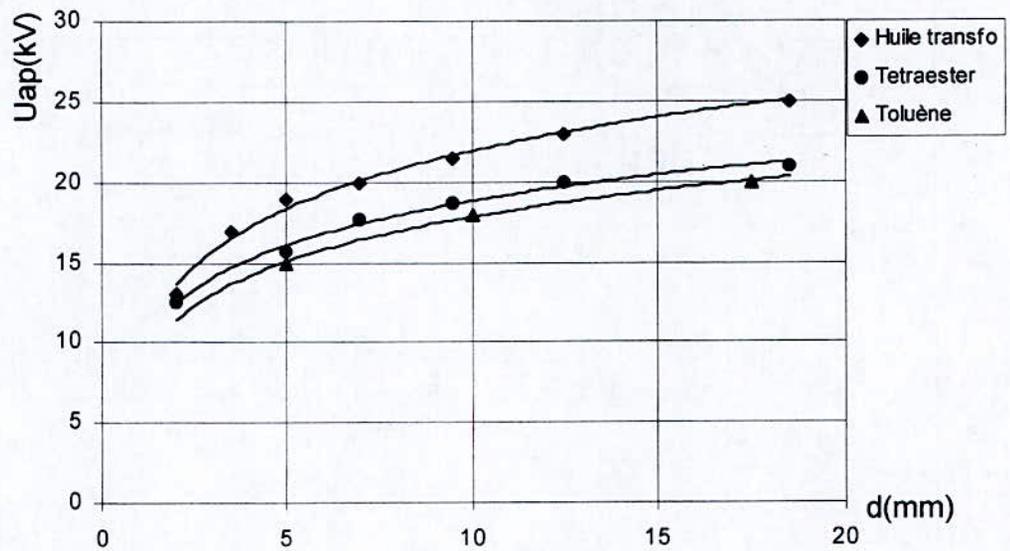


Fig.30 : Tension d'apparition des streamers en fonction de la distance inter-électrodes pour les trois liquides ($r_p=10\mu\text{m}$)

5- Corrélation courant-lumière.

Les courants obtenus sous l'alternance positive de la tension présentent une forme similaire à celle de l'émission lumineuse correspondante (fig.31). Ils sont constitués d'une composante continue dont l'amplitude croît avec la tension appliquée.

Les pics de lumière devant corrélés avec ceux du courant ne sont pas représentés dans la figure 31, du fait de leur faible amplitude par rapport à la composante continue. De plus, l'éloignement relatif de la grille de photodiodes par rapport à l'intervalle inter-électrodes (110mm) diminue sa sensibilité.

Sous l'alternance négative, les courants et émissions lumineuses enregistrés sont parfaitement corrélés en forme et en intensité. Ils sont caractérisés par des impulsions brèves, irrégulièrement espacées et dont l'amplitude croît généralement avec le temps. La figure 32 montre un cas typique de courant obtenu sous l'alternance négative et l'émission lumineuse correspondante dans l'huile minérale de transformateur.

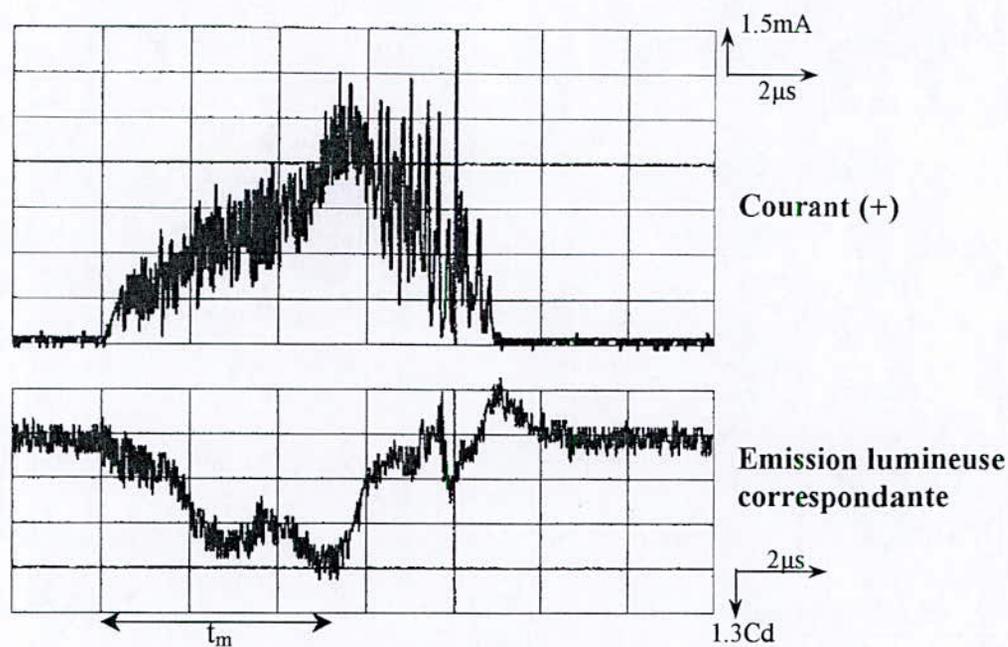


Figure 31 : Courant positif et émission lumineuse correspondante dans l'huile minérale de transformateur. $d=10\text{mm}$, $U=25\text{kV}$, $r_p=10\mu\text{m}$.

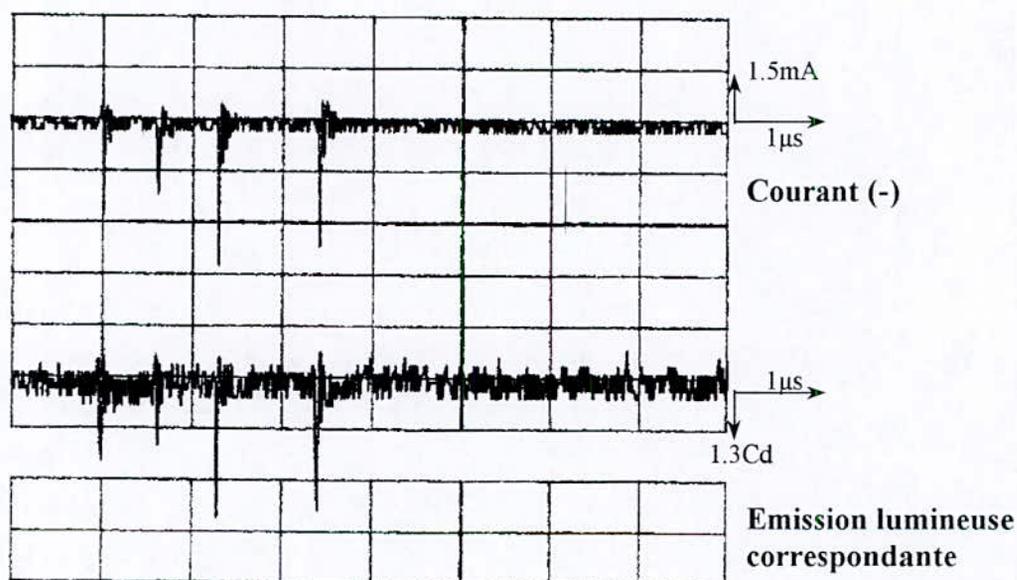


Figure 32 : Courant négatif et émission lumineuse correspondante dans l'huile minérale de transformateur. $d=5\text{mm}$, $U=23\text{kV}$, $r_p=10\mu\text{m}$.

6- Influence de la nature du liquide :

Dans les trois liquides, les courants apparaissant sur l'alternance négative sont constitués de quelques pics irrégulièrement espacés dont l'amplitude est relativement faible devant les courants positifs. Leur fréquence d'apparition est moins importante que celle des courants positifs dans l'huile minérale et le tetraester. Dans le toluène, ils apparaissent plus prématurément et en plus grande proportion par rapport aux courants positifs, sur toute la gamme de tension d'étude.

La proportion des streamers positifs est plus importante dans le tetraester et l'huile minérale que dans le toluène (fig.33).

Les formes des courants positifs sont semblables dans l'huile minérale et le tetraester. Celles relevées pour le toluène se distinguent des précédentes par la présence de forts pics de courant d'amplitude nettement plus importante que celle de la composante continue sur laquelle ils sont superposés (fig.34).

Le temps t_m correspondant au maximum de la composante continue du courant positif est différent d'un liquide à l'autre. Pour une distance inter-électrodes de 10mm, il est d'environ $3\mu s$ dans le toluène, $5\mu s$ dans le tetraester et $6\mu s$ dans l'huile minérale.

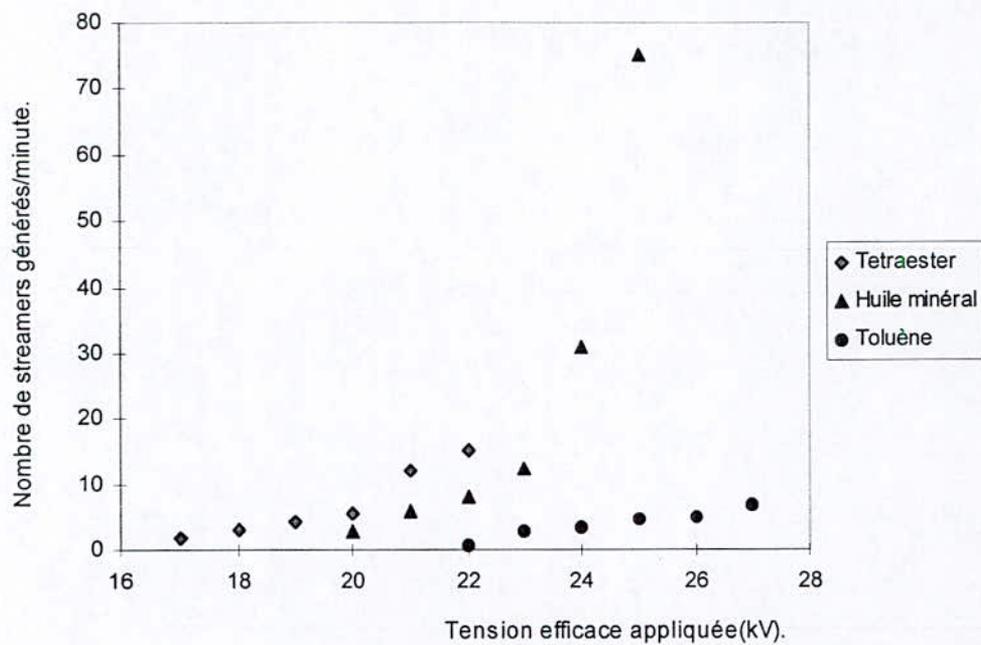


Fig.33 : Variations du nombre de streamers positifs générés par minute d'application de la tension en fonction du niveau de tension appliquée. $d=5\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$.

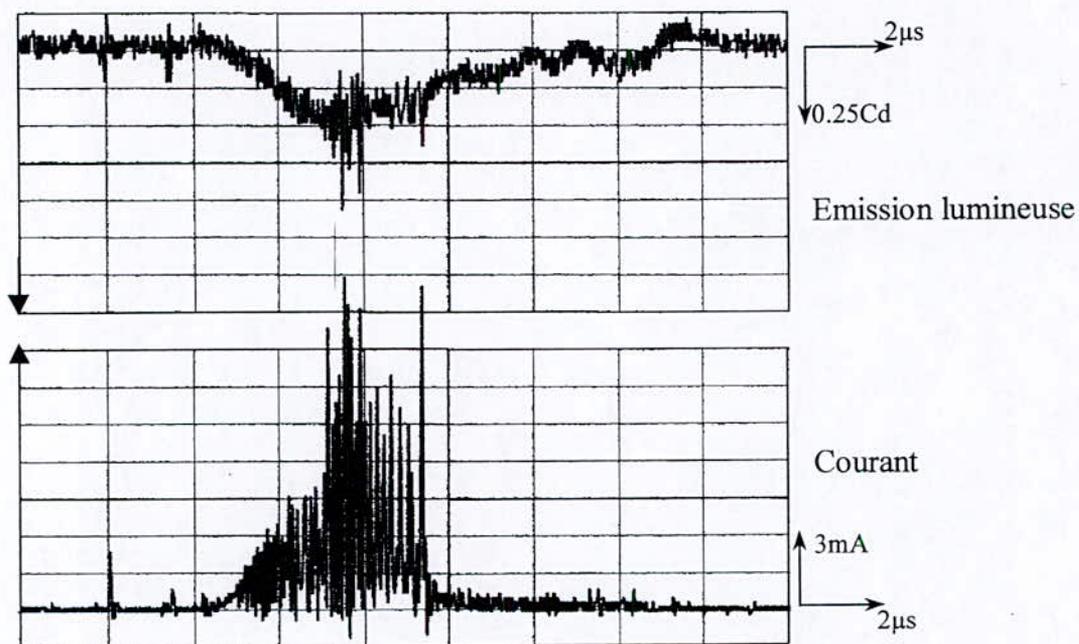


Fig.34 : Courant positif et émission lumineuse correspondante dans le toluène. $d=10\text{mm}$, $U=29\text{kV}$, $r_p=10\mu\text{m}$.

7- Alternance de la tension:

Dans l'huile minérale et le tétraester, les streamers positifs sont les premiers à être détectés. Les courants correspondants sont supérieurs à ceux des streamers négatifs. La figure 35 représente la plage de variation des courants positifs et négatifs enregistrés dans le tétraester. Cette plage est d'autant plus élargie que la distance inter-électrodes est grande.

Les streamers négatifs se manifestent uniquement lorsque la tension est élevée, à l'approche du seuil de claquage (fig. 36.a et 36.b). Cependant, tous les claquages observés dans l'huile minérale se sont produits sous l'alternance positive, alors que dans le tétraester, nous les avons observés sous les deux polarités, avec une prédominance des claquages négatifs.

Dans le toluène, ce sont plutôt les streamers négatifs qui apparaissent de façon prédominante, les positifs ne sont enregistrés qu'en faible proportion (fig. 36.c).

Dans le tétraester, à $d=2\text{mm}$, tous les streamers sont positifs pour une tension comprise entre 14 et 16kV. A 18kV, le pourcentage de streamers négatifs générés est de 15%. Il passe à 25% pour 19kV et atteint 85% à 20kV. Tous les streamers négatifs enregistrés à 17 et 18kV sont semblables à ceux des deux autres liquides. Ils sont constitués de quelques pics discrets de faible amplitude, sans composante continue (fig. 37.a). Au delà de 19kV, une autre forme de courant négatif est exclusivement enregistrée dans ce liquide. Ces courants, à l'image des courants positifs, sont constitués d'une composante continue sur laquelle sont superposés des pics de très grande amplitude (fig. 37.b). Ils sont très énergétiques et correspondent à un streamer arrivant sur l'électrode plane en un temps de l'ordre de $8\mu\text{s}$ (environ 3 fois le temps nécessaire aux streamers positifs pour atteindre le plan).

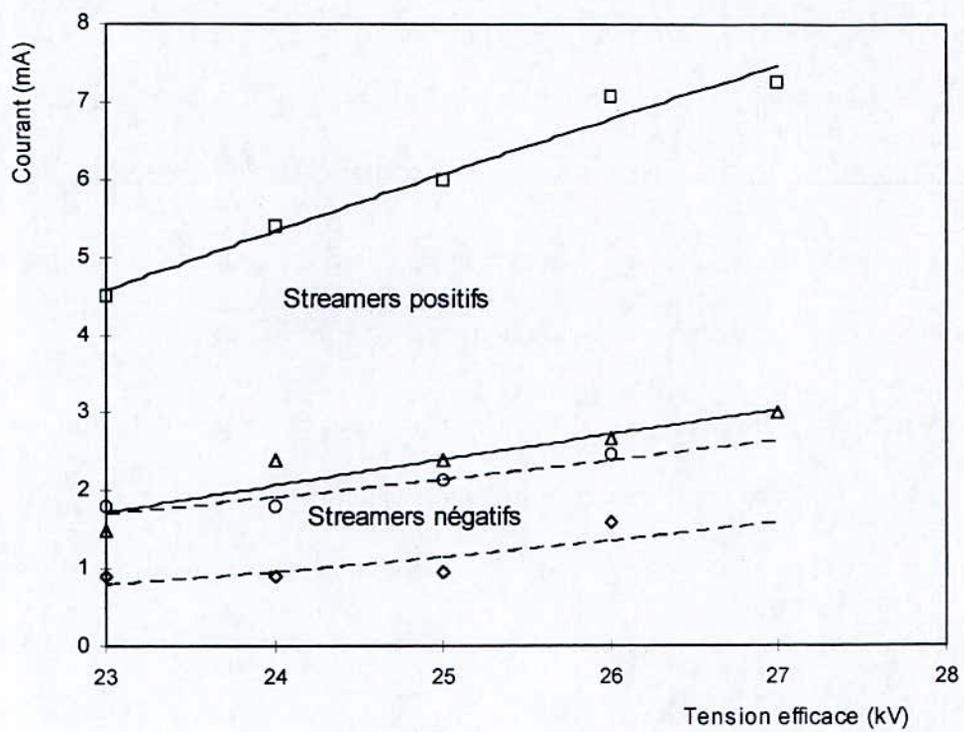


Fig.35 : Plages de variation des courants de streamers positifs et négatifs en fonction de la tension dans le tetraester.
 $d=18.5\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$.

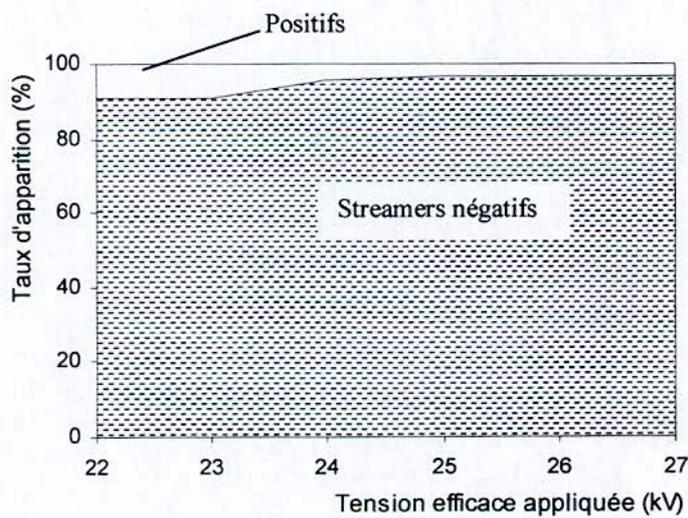
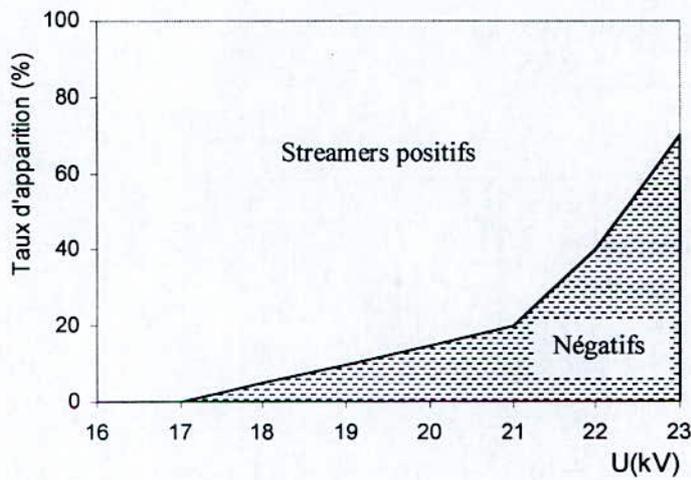
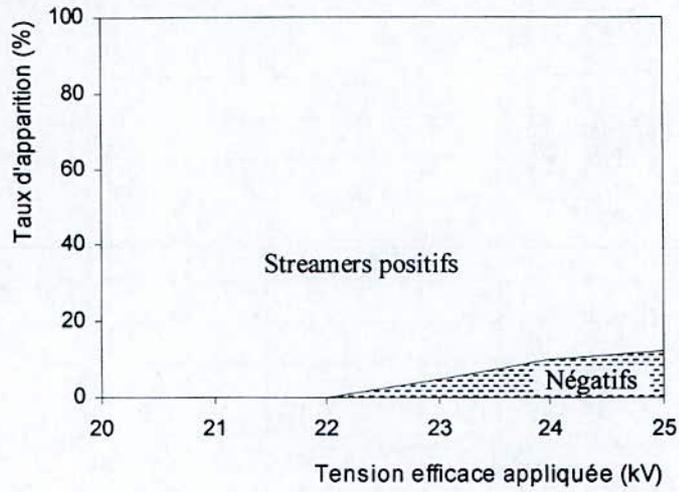


Fig. 36 : Taux d'apparition des streamers positifs et négatifs sous tension alternative, en fonction du niveau de tension appliquée.

$d=5\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$.

(a): Huile minérale.

(b): Tetraester.

(c): Toluène.

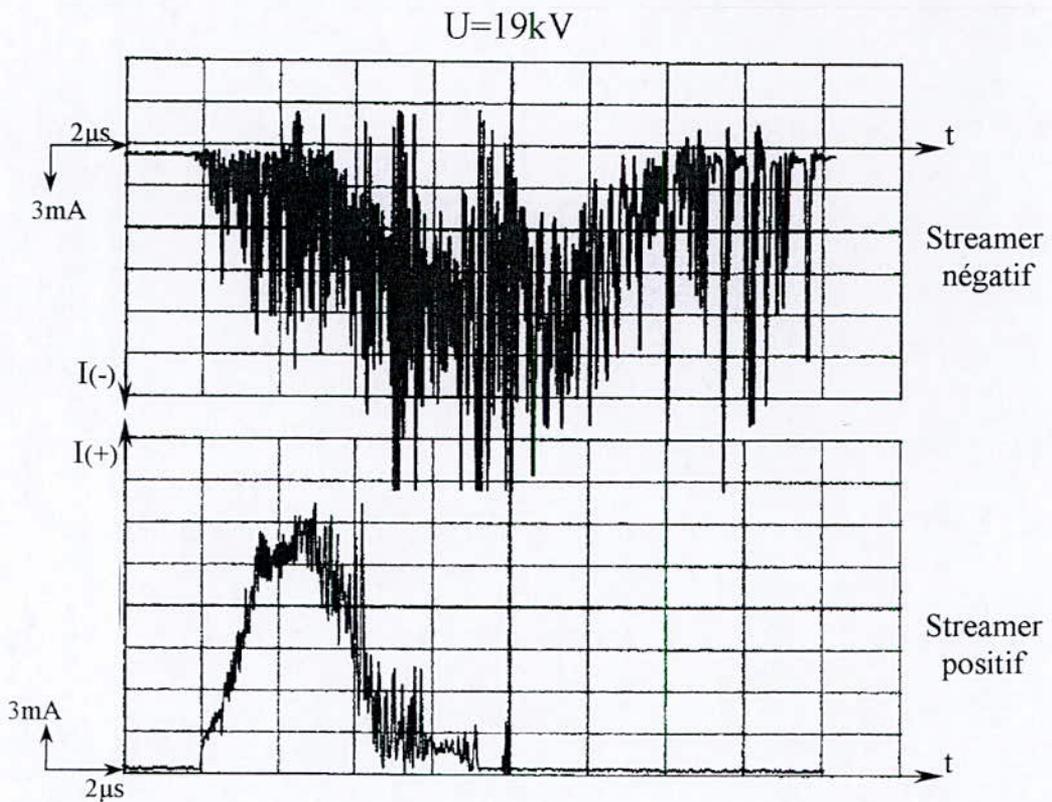
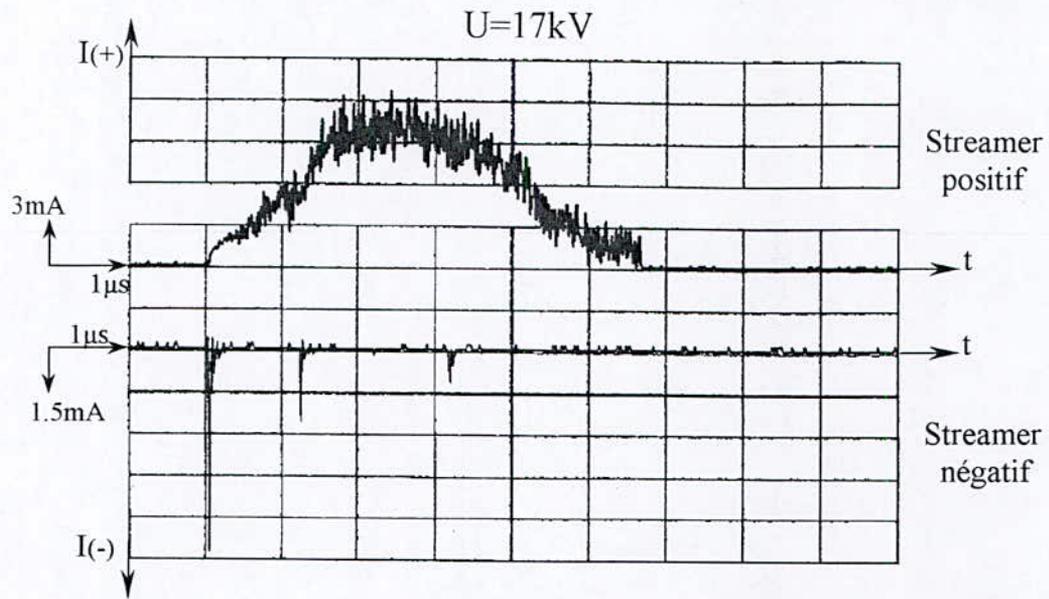


Fig. 37 : Courants positif $I(+)$ et négatif $I(-)$ d'une même série dans le tetraester à $d=2\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$. (a) : $U=17\text{kV}$. (b) : $U=19\text{kV}$.

8- Analyse fréquentielle

Contrairement aux impulsions de courant caractérisant les streamers négatifs qui sont irrégulièrement espacées, celles correspondant aux streamers positifs sont assez régulières. Leurs fréquences semblent être peu affectées par la distance inter-électrodes et le niveau de tension appliquée.

La figure 38 représente un courant positif obtenu dans l'huile minérale ainsi que sa transformée de Fourier (F.F.T.) correspondante. Ce courant comporte tous les types d'impulsions observées et sa F.F.T. indique l'existence de 6 composantes.

Le pic N°1, de forte puissance et de fréquence zéro, correspond à la composante continue du courant.

Le pic N°2, de fréquence de l'ordre de 3MHz, correspond aux impulsions de la zone C de la figure 38. Ces impulsions sont discrètes, à l'image de celles observées pour les streamers négatifs dont la fréquence se situe entre 1 et 2MHz.

Le pic N°3, de fréquence 10MHz, correspond aux impulsions de la zone A qui se superposent à la composante continue.

Les pics 4, 5 et 6, de forte énergie, correspondent aux pics de décharge de la zone B. Leurs fréquences sont élevées ; elles sont respectivement de 32, 37 et 42MHz.

La composante continue du courant et les pics qui lui sont superposés représentent les éléments décisifs dans la propagation du streamer. Les pics de la zone C semblent jouer un rôle plutôt secondaire ; aucun claquage n'est observé à l'issue de ces derniers. L'énergie représentée par la composante continue du courant est d'autant plus grande que le streamer avance dans le liquide, et celle représentée par les pics qui lui sont superposés est quasiment constante dans le temps.

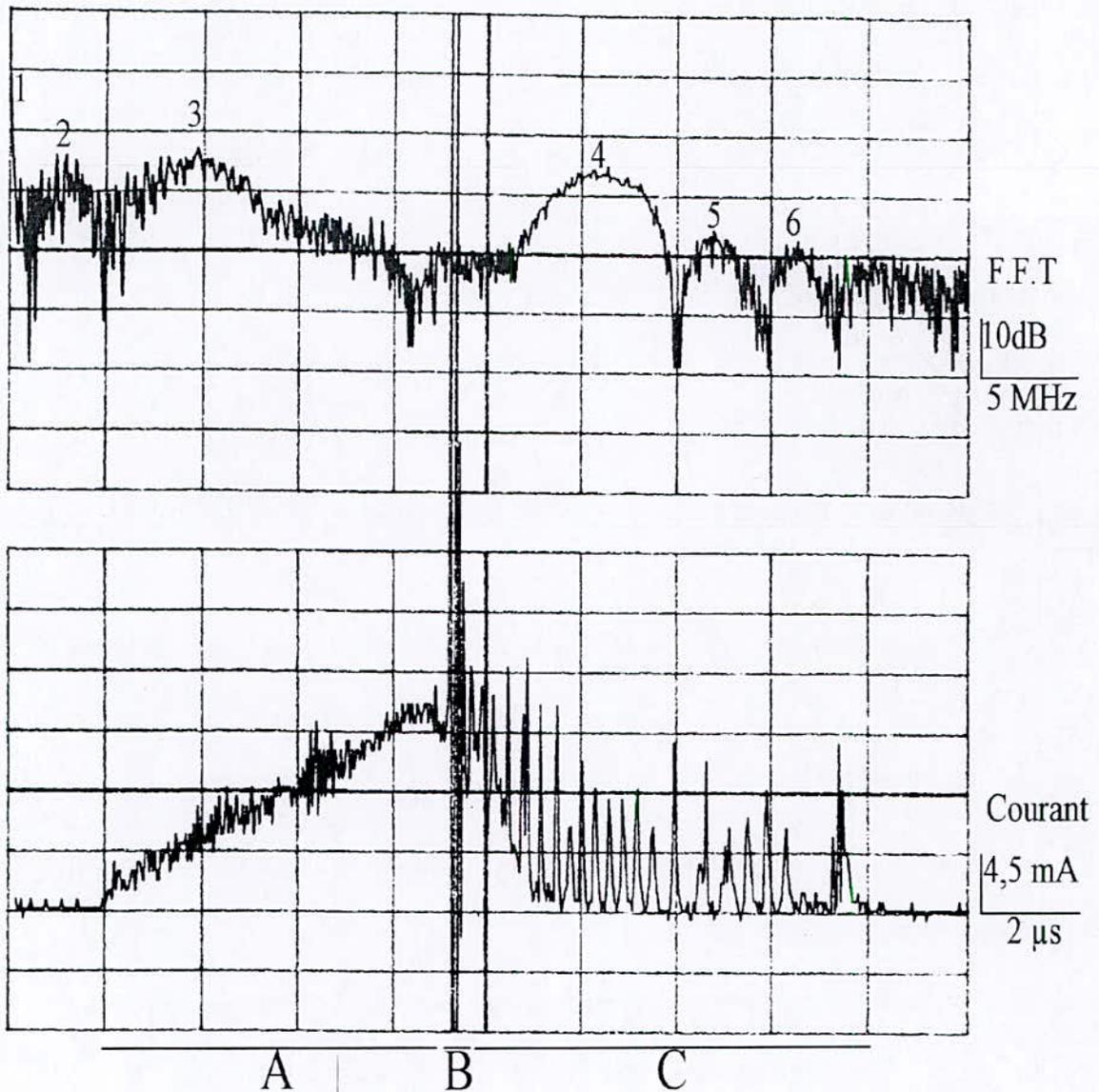


Figure 38: Courant de streamer positif (signal du bas) et sa transformée de Fourier 'F.F.T.' (signal du haut) dans l'huile minérale de transformateur, $d=12.5\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$, $U=29\text{kV}$.

Conclusion

Les courants et émissions lumineuses associés aux streamers positifs rapides et négatifs lents sont différents dans la forme, l'amplitude et la durée. Les positifs sont essentiellement constitués d'une composante continue sur laquelle sont superposés des pics de fréquence assez régulière. L'amplitude de la composante continue augmente alors que celle des pics diminue avec le niveau de tension appliqué.

Les courants négatifs correspondant à des streamers lents, sont constitués de quelques pics discrets de faible amplitude et espacés de façon irrégulière. Cependant, aux faibles niveaux de tension, il est possible d'obtenir des courants positifs similaires, dans la forme, à ceux enregistrés sous l'alternance négative, mais de fréquence plus importante et plus régulière. De même, des courants négatifs, similaires à ceux obtenus sous l'alternance positive, sont enregistrés dans le tetraester lorsque la tension appliquée est élevée à un niveau au dessus du seuil de claquage.

Dans nos investigations, nous nous sommes fixés une tension limite correspondant à une probabilité de claquage de 50%. Il est par conséquent possible que d'autres types de streamers puissent exister au delà de ce seuil.

Dans l'huile minérale et le tetraester, les streamers négatifs n'apparaissent qu'au seuil de claquage et, en faible proportion par rapport aux positifs.

Par contre, dans le toluène, les streamers positifs et négatifs sont enregistrés sur toute la plage de tension d'étude, avec une forte proportion de streamers négatifs. Cependant, pour les trois liquides étudiés, l'énergie mise en jeu pour le développement des streamers négatifs lents est nettement inférieure à celle nécessaire pour les streamers positifs.

La probabilité d'apparition d'un type de streamer par rapport à l'autre, dépendrait des propriétés physico-chimiques intrinsèques à chaque liquide. La température d'évaporation du toluène, nettement inférieure à celle de l'huile minérale et le tetraester, serait un des éléments favorisant l'apparition, dans ce liquide, d'une forte proportion de streamers négatifs par rapport aux positifs.

Chapitre 4

ETUDE SOUS TENSION CONTINUE

Introduction

Dans ce chapitre, nous analyserons l'influence du niveau de tension, de la polarité de la pointe, de la distance inter-électrodes et de la nature du liquide sur la fréquence d'apparition des streamers, la forme, la durée et l'amplitude des courants de streamers ainsi que la charge électrique correspondante. On étudiera également l'influence de la distance inter-électrodes et de la polarité de la pointe sur les seuils d'initiation et de claquage dans chaque liquide.

Une attention particulière sera portée sur les émissions lumineuses et leur corrélation avec les courants correspondants. Les fréquences des différents pics de courant et de lumière seront également traités et analysés à l'aide de la transformée de Fourier.

1- Fréquence d'apparition des streamers:

L'apparition des streamers sous tension continue n'est pas régulière dans le temps, notamment lorsque le niveau de tension appliqué est relativement bas. Quelques streamers (au plus 5) sont générés dès les cinq premières minutes suivant l'application de la tension pour ensuite marquer un temps relativement long, de l'ordre de 30 minutes, avant l'apparition d'autres streamers. Aux tensions plus élevées, les streamers apparaissent de façon plus régulière.

Les figures 39 et 40 montrent l'évolution de la fréquence d'apparition des streamers positifs et négatifs en fonction de la tension appliquée.

Dans le toluène, les streamers négatifs apparaissent à des tensions plus faibles et avec une fréquence plus importante que celle des streamers négatifs dans l'huile minérale et le tétraester. Leur énergie est cependant moins importante. Dans ces deux derniers liquides, la fréquence d'apparition varie peu avec le niveau de tension appliquée.

Par contre, les streamers positifs apparaissent plus tôt et avec une fréquence plus importante, dans le tétraester et l'huile minérale que dans le toluène.

Nous avons observé des claquages lorsque la fréquence d'apparition dépasse les 5 streamers/minute en polarité négative et 25 streamers/minute en polarité positive.

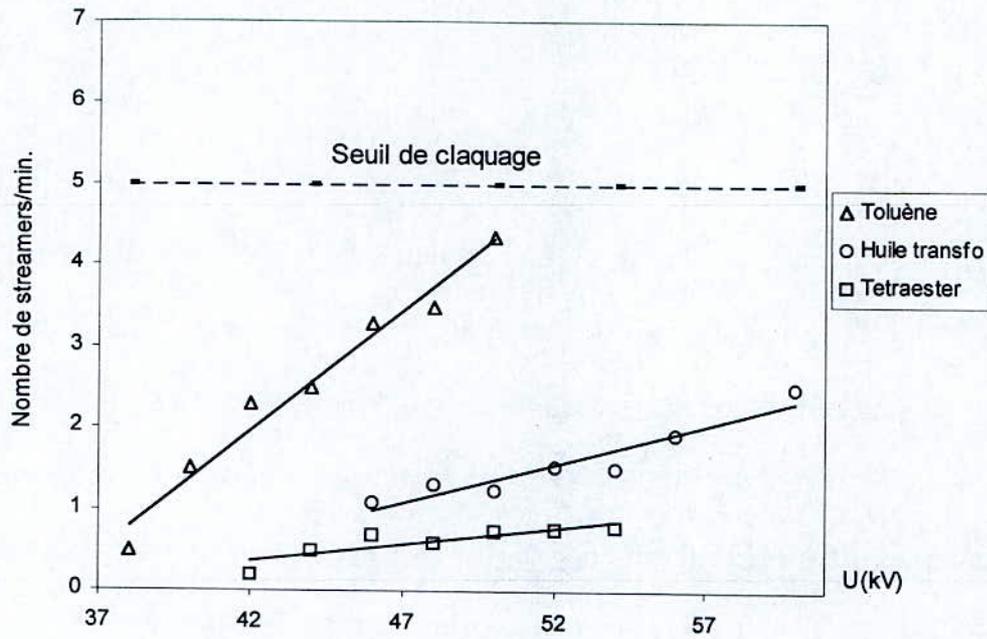


Figure 39 : Fréquence d'apparition des streamers négatifs dans les trois liquides, sous tension continue, $d=5\text{mm}$.

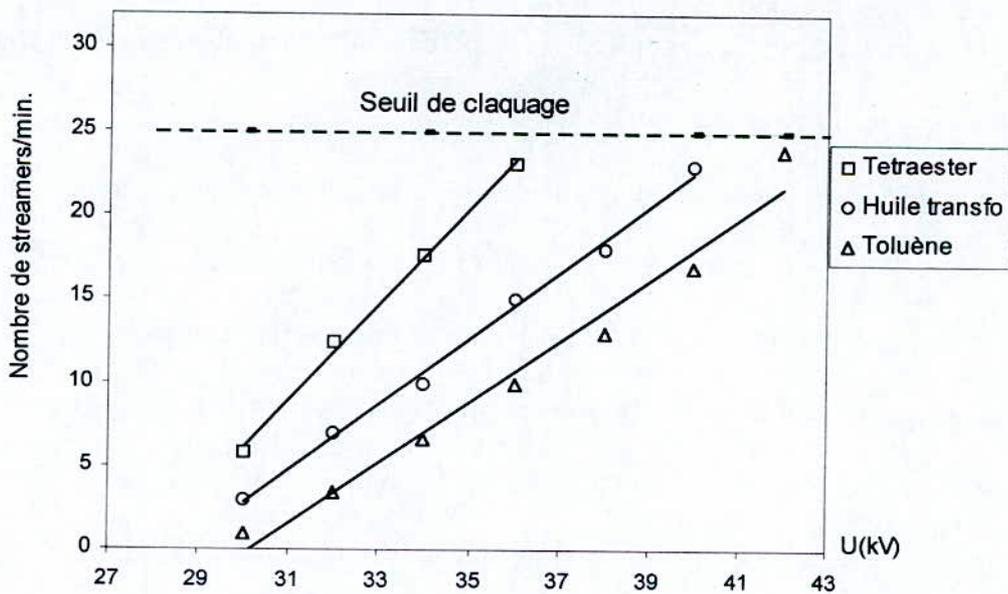


Figure 40 : Fréquence d'apparition des streamers positifs dans les trois liquides, sous tension continue, $d=5\text{mm}$.

2- Courants et charges

2.1- Courants:

Les courants associés aux streamers positifs et négatifs sont très semblables dans les trois liquides, à l'image de ceux déjà observés dans l'heptane et l'huile paraffinique [70].

Sous les deux polarités, les courants sont constitués de pics discrets très brefs de durée de l'ordre de 20 à 40ns pour les premiers pics et de 50 à 200ns pour les derniers. L'amplitude de ces pics augmente généralement dans le temps. Il est cependant difficile d'établir les variations de l'amplitude de ces courants. Sur une série de 20 streamers obtenus successivement dans les mêmes conditions expérimentales, les courants obtenus, bien que similaires dans la forme, ne présentent ni le même nombre de pics ni la même amplitude. La disposition des charges accumulées dans le liquide à la suite d'un précédent streamer, influencerait sur l'énergie nécessaire au développement du streamer suivant.

Les tableaux 2 et 3 présentent les plages de variation du nombre de pics ' N ', de leur amplitude maximale ' I_m ' et de la durée totale du courant ' T_i ' qui ont tendance à croître lorsque le niveau de tension appliqué est augmenté. Ils sont plus importants en polarité négative qu'en polarité positive.

Les streamers correspondant aux courants décrits précédemment sont relativement de faible énergie et aucun d'eux ne mène au claquage. Lorsque ce dernier a lieu, le courant du streamer change fondamentalement de forme. Il présente une composante continue semblable à celles des courants relatifs aux streamers positifs, observés sous tension alternative (fig. 41).

Quelle que soit la polarité de la pointe, la forme du courant, donc du streamer correspondant, change selon que ce dernier aboutisse ou non à un claquage. Sa vitesse, étant corrélée à sa forme, serait alors plus importante lorsqu'il est suivi d'un claquage.

Huile minérale				Tetraester				Toluène			
U-(kV)	N pics	Im(mA)	Tt(μ s)	U-(kV)	N pics	Im(mA)	Tt(μ s)	U-(kV)	N pics	Im(mA)	Tt(μ s)
46	17÷25	19 ÷23	25÷32	44	15÷20	17÷22	28÷38	40	15÷22	10÷15	36÷55
48	20÷27	22÷28	30÷43	46	17÷25	18÷23	30÷42	42	17÷23	12÷18	38÷57
50	25÷35	24÷29	34÷46	48	20÷27	19÷24	30÷44	44	18÷25	18÷22	40÷58
52	28÷37	25÷30	40÷47	50	25÷28	21÷25	32÷45	46	20÷27	20÷24	42÷60
54	28÷38	26÷32	42÷48	52	26÷29	23÷26	35÷48	48	21÷29	20÷25	42÷63
56	30÷40	29÷34	43÷50	54	27÷32	24÷27	38÷65	50	23÷30	21÷26	45÷65

Tableau 2 : Variations du nombre de pics 'N', de leur amplitude maximale 'Im' et de la durée totale du courant 'Tt' en fonction du niveau de tension appliqué. d=5mm. Polarité négative.

Huile minérale				Tetraester				Toluène			
U+(kV)	N pics	Im(mA)	Tt(μ s)	U+(kV)	N pics	Im(mA)	Tt(μ s)	U+(kV)	N pics	Im(mA)	Tt(μ s)
34	10÷14	2÷6	10÷27	36	6÷16	1÷5	10÷25	36	10÷15	1÷3	10÷25
36	11÷17	3÷10	13÷30	38	7÷18	2÷8	13÷30	38	14÷20	2÷5	15÷30
38	13÷18	4÷12	15÷32	40	10÷20	3÷10	15÷32	40	18÷25	3÷8	20÷35
42	15÷22	6÷15	20÷35	42	12÷22	5÷12	17÷35				
44	18÷25	8÷17	30÷40								
48	24÷32	9÷20	35÷45								

Tableau 3 : Variations du nombre de pics 'N', de leur amplitude maximale 'Im' et de la durée totale du courant 'Tt' en fonction du niveau de tension appliqué. d=5mm. Polarité positive.

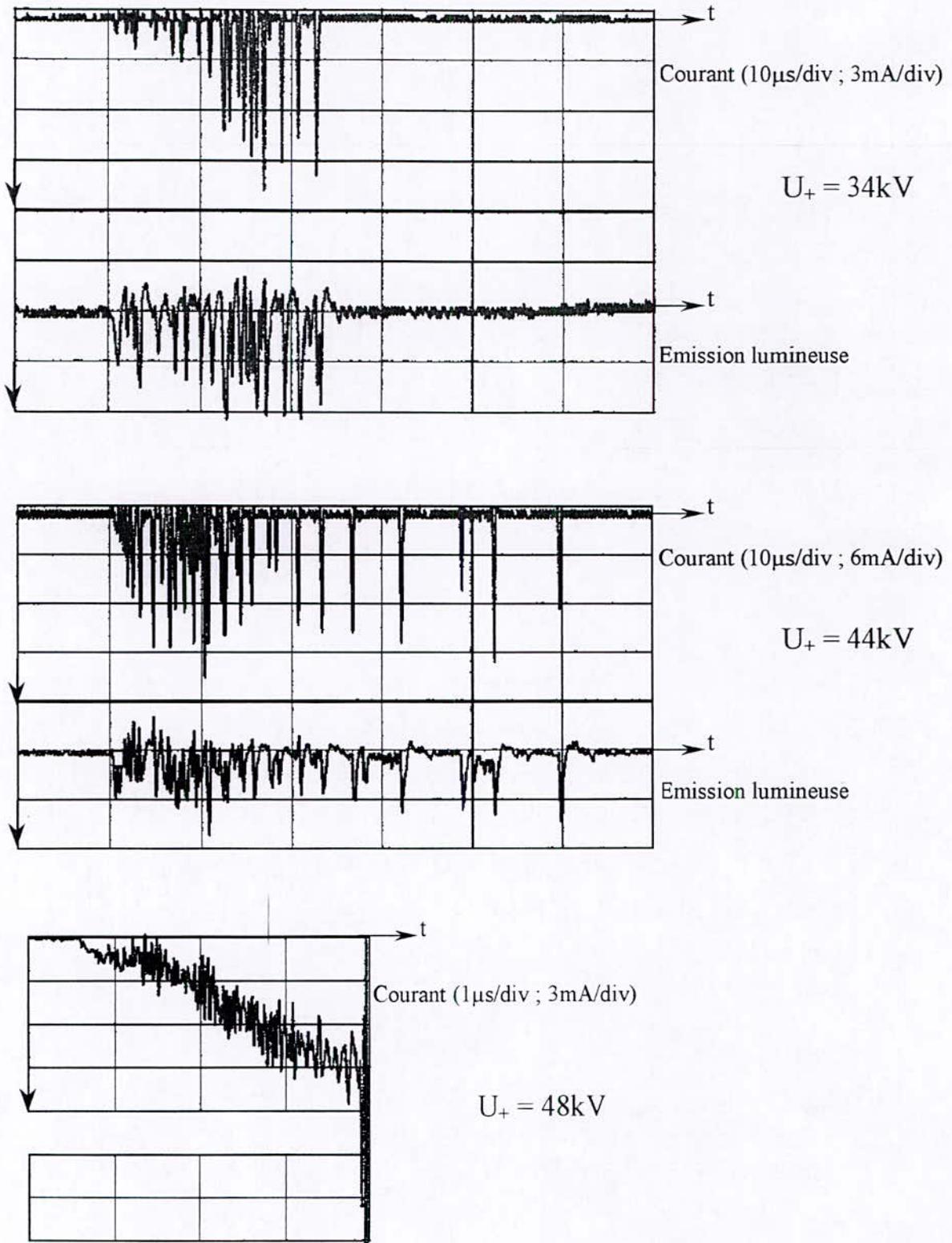


Fig. 41: Variations du courant avec la tension dans l'huile minérale.
Tension continue positive. $d=2.5\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$.

2.2- Charges:

Sous les deux polarités, la charge électrique évolue par sauts, ce qui lui donne une forme en escaliers, pour les niveaux de tension considérés (fig.42). Chaque saut correspond à l'apparition d'un pic de courant se déchargeant dans une phase de faible densité [19,22,71], en un temps relativement court (moins de 50ns) par rapport à celui nécessaire à l'apparition du prochain pic (en général supérieur à 1 μ s). Cette façon d'évoluer de la charge et du courant indique que les streamers correspondants sont lents [12,24].

La charge finale du streamer dépend du nombre de pics de courant et de leur amplitude. Elle augmente lorsque le niveau de tension appliqué augmente ou/et la distance inter-électrodes diminue (fig.43 à 45). Ceci est valable seulement lorsque le streamer s'éteint après son arrivée sur le plan. Lorsque celui-ci est suivi par un claquage, la charge nécessaire à sa propagation devient relativement faible; la quasi totalité de la charge restante sera mise en jeu durant la phase de claquage. Des résultats similaires ont été rapportés en longues distances dans l'huile minérale, sous tension impulsionnelle [72].

Contrairement à ce qui était attendu, la charge des streamers négatifs lents est plus importante que celle des streamers positifs de même forme. Par contre, l'amplitude de la charge n'est pas seulement liée à la polarité de la pointe, mais aussi à la vitesse. Des résultats similaires, relatifs aux streamers rapides sous créneau de tension, ont été rapportés par A. Beroual [19]. Les charges dans l'huile minérale et le tétraester sont comparables et varient de la même manière avec la tension. Elles sont nettement supérieures à celles mesurées dans le toluène, dans les mêmes conditions expérimentales.

Toutes ces expériences sont effectuées avec une pointe de rayon de courbure constant ($r_p=10\mu\text{m}$). Si l'on doit évaluer les variations de la charge en fonction de r_p/d , d étant la distance inter-électrodes, il en ressort que la charge globale des streamers positifs et négatifs augmente avec l'accroissement de ce rapport.

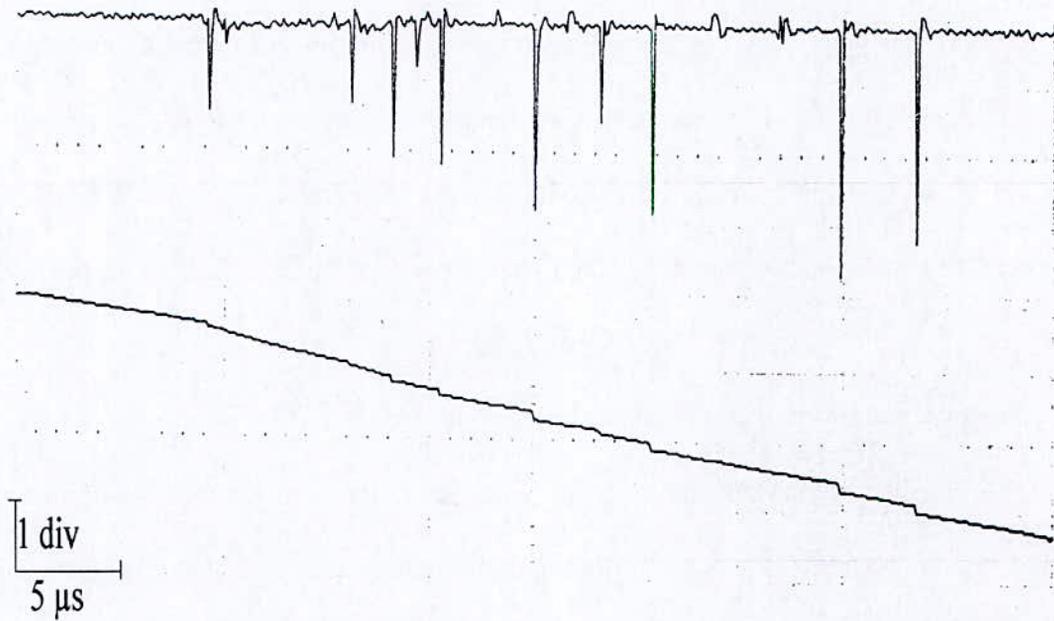


Fig.42 : Signal de courant (haut) et charge correspondante (bas) dans l'huile minérale.

$U = 50$ kV, $d = 5$ mm, $r_p = 10$ μ m. Echelle : -Courant : 3,5mA/div.
-Charge : 10nC/div.

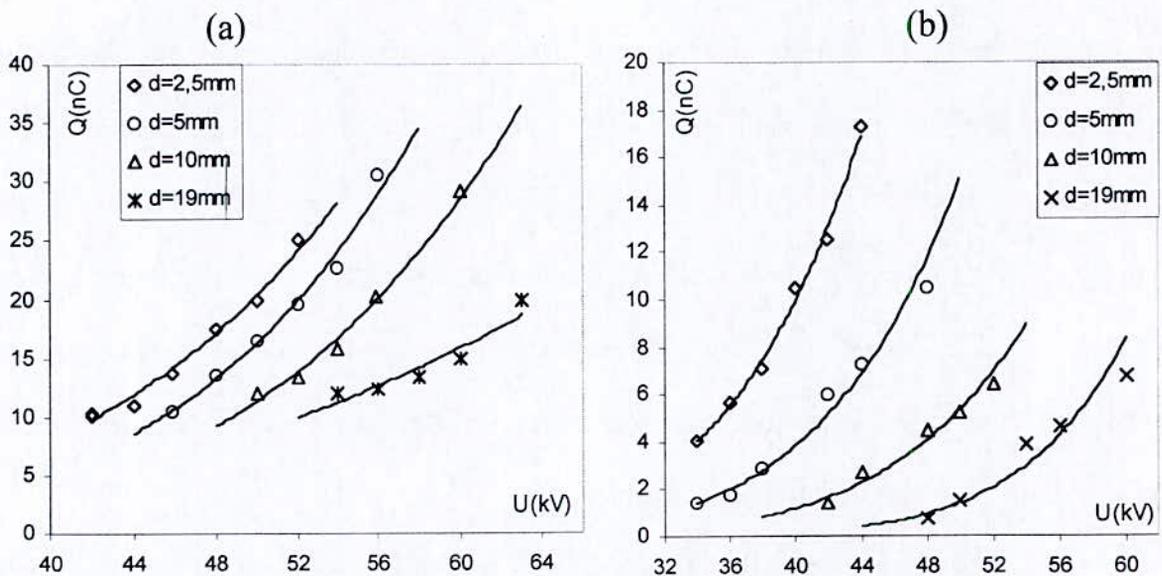


Fig.43: Charges finales moyennes des streamers en fonction du niveau de tension appliqué pour différentes distances inter-électrodes dans l'Huile minérale. (a) : streamers négatifs
(b) : streamers positifs

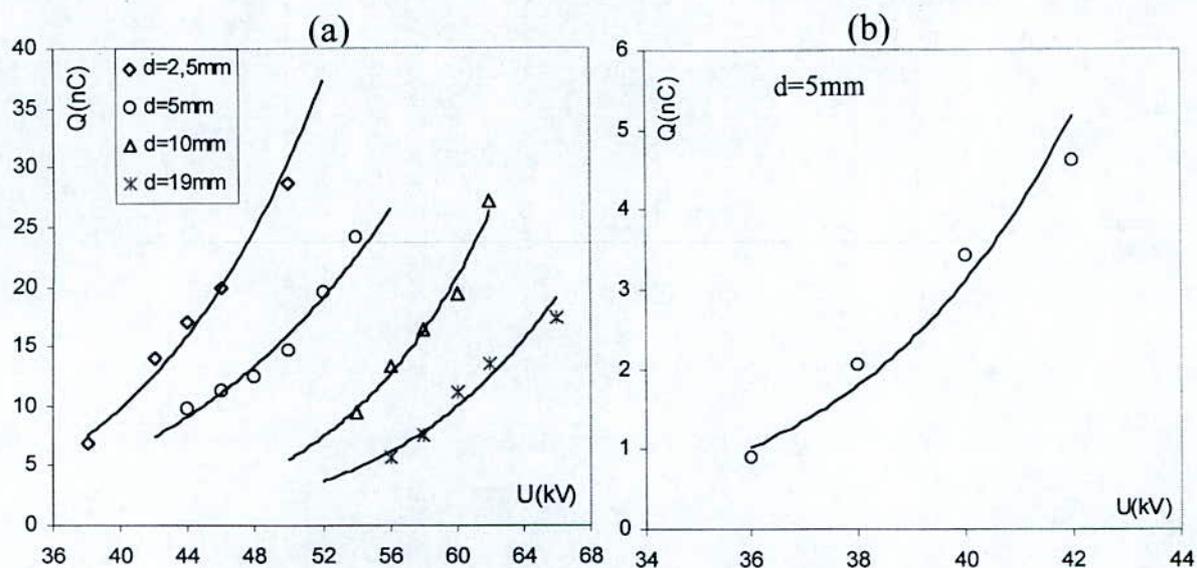


Fig.44 : Charges finales moyennes des streamers en fonction du niveau de tension appliqué pour différentes distances inter-électrodes dans le Tetraester. (a) : streamers négatifs (b) : streamers positifs

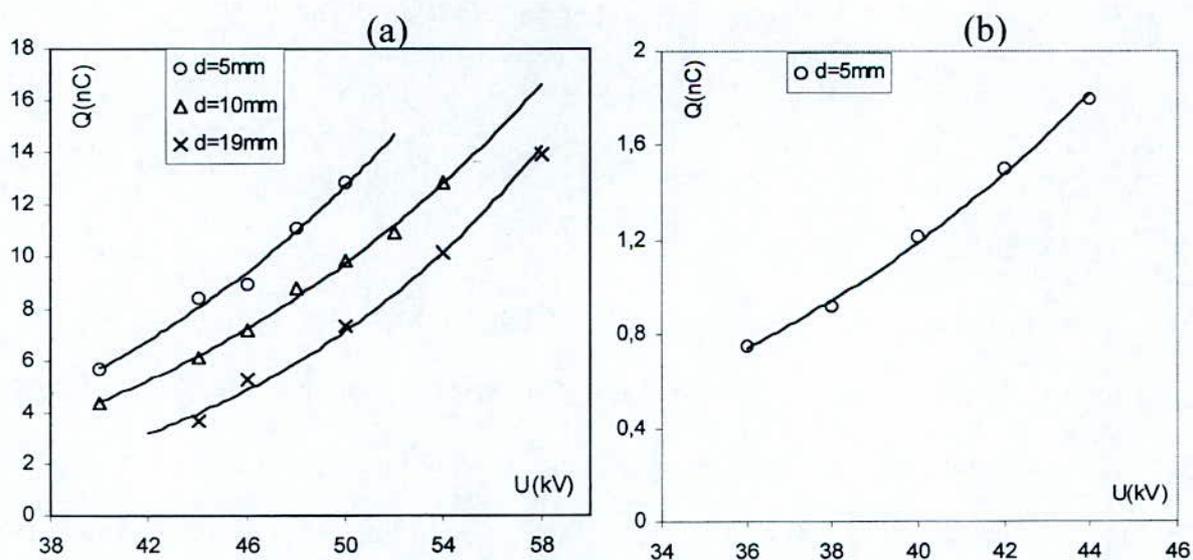


Fig.45 : Charges finales moyennes des streamers en fonction du niveau de tension appliqué pour différentes distances inter-électrodes dans le Toluène. (a) : streamers négatifs (b) : streamers positifs

3- Influence du niveau de tension appliquée

Le nombre de pics de courant et d'émission lumineuse, leur amplitude et la charge correspondante augmentent avec le niveau de tension appliqué.

Dans tous les liquides testés, la tension nécessaire à l'apparition des streamers sous tension continue est nettement plus élevée qu'en tension alternative. La tension seuil de claquage en courant continu est également supérieure qu'en courant alternatif. Des claquages peuvent cependant survenir à des niveaux de tension inférieurs à ce seuil, lorsque la tension est augmentée ou diminuée de manière rapide (environ 20 kV/s).

Tous les claquages observés ont été précédés par la propagation de streamers rapides dont la forme et le temps de montée ' t_{max} ' sont similaires à ceux enregistrés en tension alternative sous l'alternance positive (fig.46 et 47).

Le rapport de la distance inter-électrodes au temps de montée du courant ' d/t_{max} ' est de l'ordre de 1km/s pour le tetraester. Le temps de retard au claquage ' t_c ' est différent de ' t_{max} ' (fig.46) ; il est d'autant plus faible que la tension appliquée est importante.

4- Distance inter-électrodes

Les dimensions de la cellule d'essai nous limitent à des distances inter-électrodes de 20mm. Le seuil d'initiation des streamers positifs et négatifs augmente avec la distance inter-électrodes. Cette augmentation est cependant assez modeste. Le seuil d'initiation passe de 34kV pour une distance de 2.5mm à seulement 42kV pour une distance de 19mm, dans l'huile minérale lorsque la polarité de la pointe est positive (fig.48). En polarité négative, il passe de 42kV pour la distance $d=2.5mm$ à 53kV pour la distance $d=19mm$. Ce seuil concerne les streamers dont les courants sont supérieurs au seuil de déclenchement du "trigger" (de l'ordre de 1mA). Comme les courants négatifs sont relativement faibles, il est fort probable que des streamers négatifs sont générés à des seuils inférieurs à ceux rapportés ci-dessus.

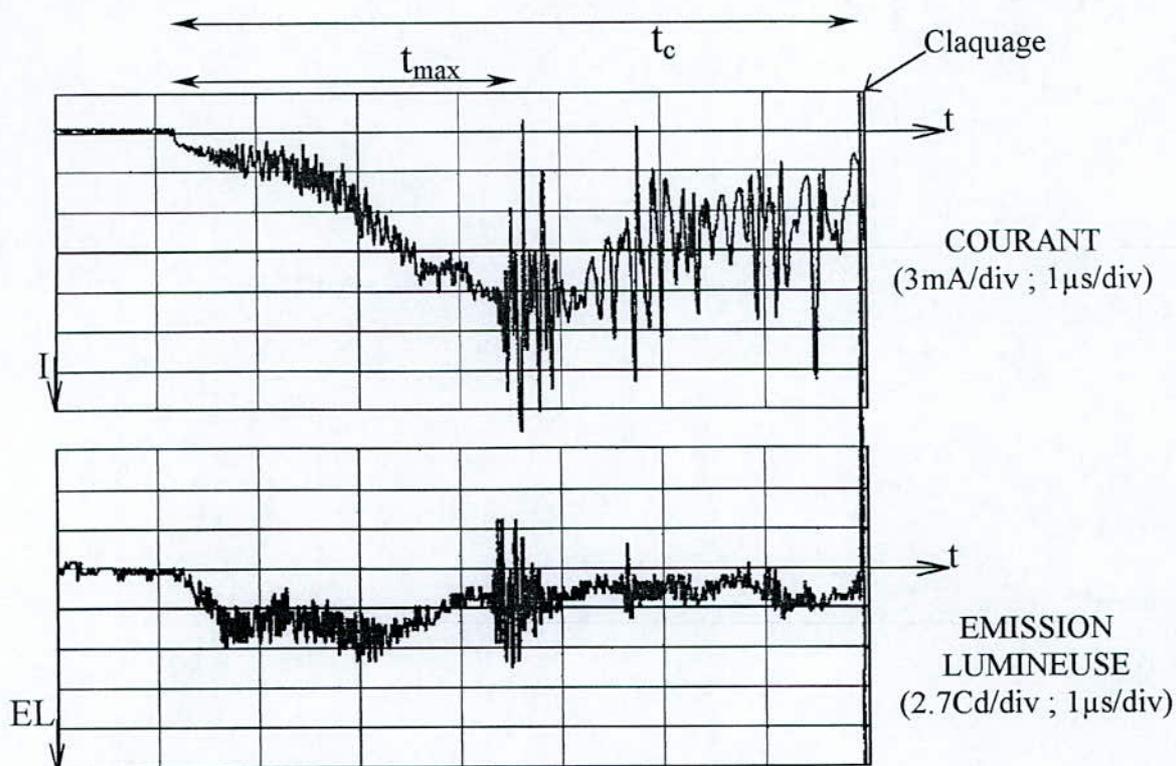


Fig.46 : Courant 'I' et émission lumineuse 'EL' d'un streamer suivi par un claquage obtenus dans le tétraester suite à une augmentation rapide de la tension. Polarité positive. $U=34\text{kV}$, $d=2.5\text{mm}$.

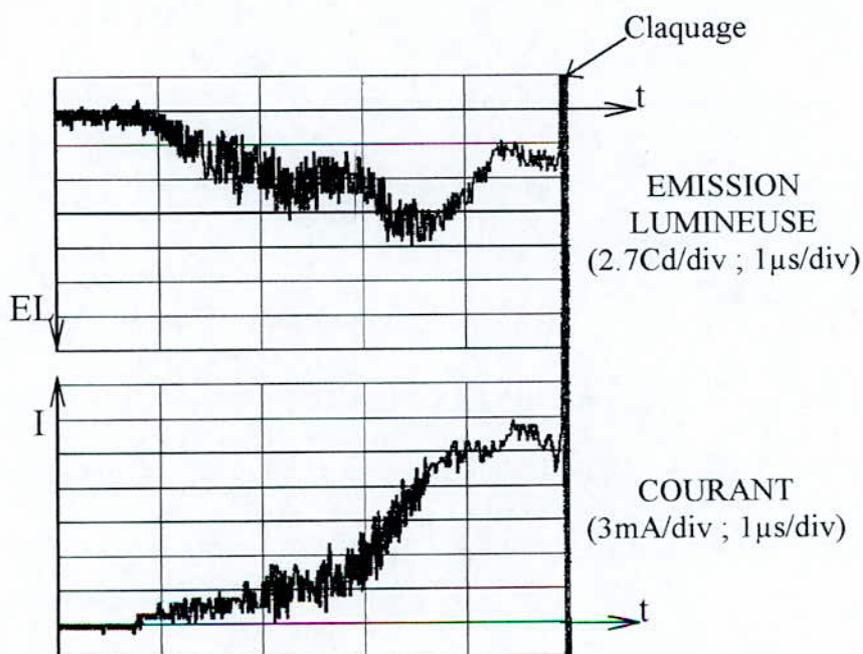


Fig.47 : Courant 'I' et émission lumineuse 'EL' d'un streamer suivi par un claquage obtenus dans le tétraester suite à une baisse rapide de la tension. Polarité négative. $U=50\text{kV}$, $d=2.5\text{mm}$.

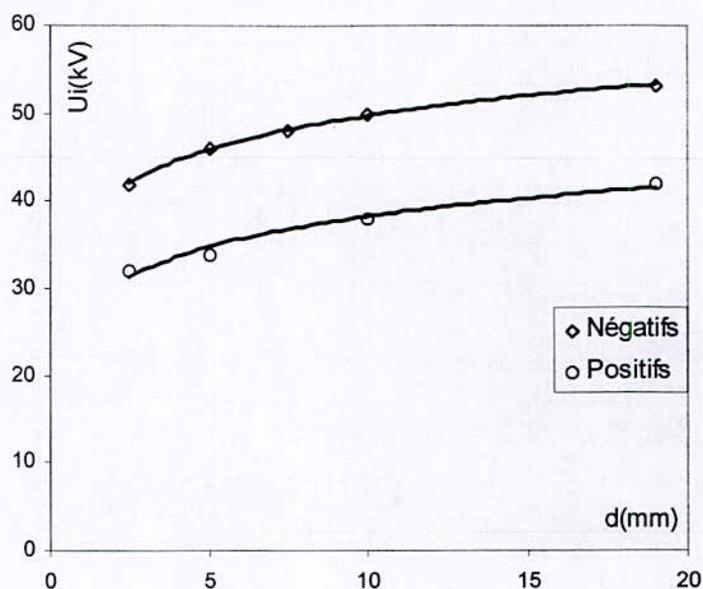


Fig. 48 : Tension seuil d'initiation ' U_i ' des streamers positifs et négatifs en fonction de la distance inter-électrodes ' d ' dans l'huile minérale, $r_p=10\mu\text{m}$.

5- Corrélation courant- lumière:

En général, les courants des streamers positifs et négatifs et les émissions lumineuses correspondantes sont parfaitement corrélés en forme et en amplitude. Cependant, dans l'huile minérale et le tétraester en polarité négative, si le courant est nul entre deux pics successifs, la lumière correspondante présente une composante continue croissante dans le temps en allant d'un pic à l'autre (figure 49). Des observations similaires ont été rapportées dans l'huile minérale en longues distances sous créneau de tension [73]. Ceci n'a pas été observé dans le toluène.

Dans les trois liquides et notamment en polarité négative, nous avons observé que certains pics de lumière n'étaient pas corrélés à des pics de courant (fig.50). Ceci est d'autant

plus fréquent que la distance inter-électrodes est grande. Des pics de courant sans pics de lumière correspondants ont été également enregistrés dans l'huile minérale et le tetraester lorsque la tension est relativement faible. Ces deux phénomènes sont observés dans la phase correspondant à la fin de la propagation du streamer. D'autre part, la durée totale de l'émission lumineuse est assez souvent plus importante que celle du courant correspondant.

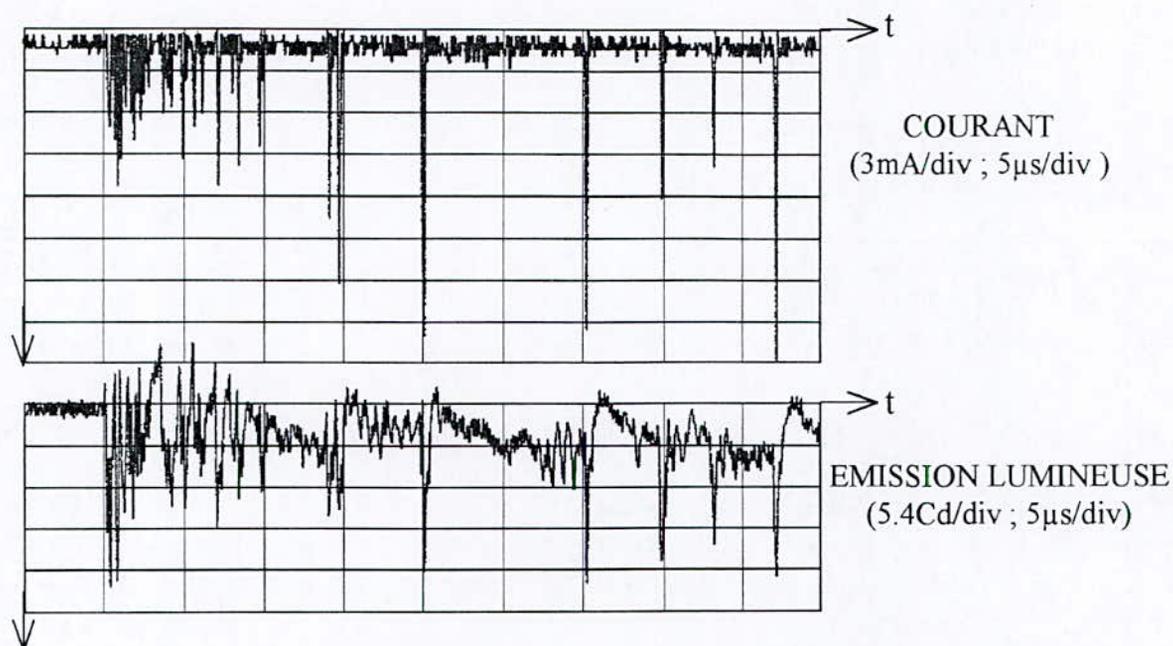


Figure 49: Courant typique de streamer et émission lumineuse correspondante dans l'huile minérale. $U_- = 50\text{kV}$, $d = 10\text{mm}$, $r_p = 10\mu\text{m}$.

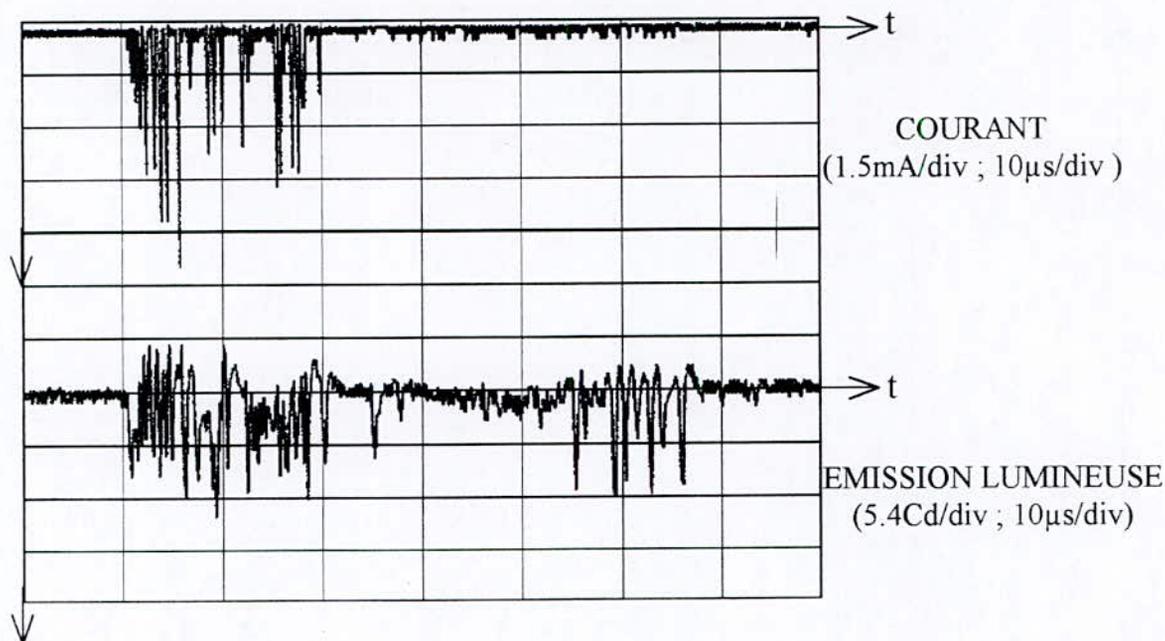


Fig.50 : Courant et émission lumineuse avec des pics de lumière sans pics de courant correspondants dans l'huile minérale. $U_+ = 56\text{kV}$; $d = 18\text{mm}$; $r_p = 10\mu\text{m}$.

6- Nature du liquide

Les streamers dans l'huile minérale, bien qu'apparaissant à des niveaux de tension plus élevés (fig. 51), présentent des courants (charges) dont l'amplitude et la durée sont nettement supérieures à celles enregistrées dans les deux autres liquides.

Dans l'huile minérale et le tétraester, l'émission lumineuse apparaît sous forme de pics discrets de fréquence régulière et relativement élevée, pendant une durée allant de 10 à 20 μ s. Elle tend ensuite à évoluer sous forme d'une composante continue sur laquelle sont superposés d'autres pics de fréquence moins régulière et plus faible que celle des pics précédents. Cette composante continue est d'amplitude assez faible mais tend néanmoins à augmenter avec la tension appliquée. Sa durée est de l'ordre de 80 à 100 μ s.

7- Polarité de la pointe

Dans les trois liquides étudiés, quelle que soit la polarité de la pointe, les formes des courants et émissions lumineuses sont comparables. Les seuils de claquage et d'apparition des streamers sont différents d'une polarité à l'autre. Les streamers positifs apparaissent à un niveau de tension (30kV) plus bas que celui nécessaire à l'apparition des streamers négatifs (38kV pour le toluène, 42kV pour le tétraester et 46kV pour l'huile minérale). Bien que leur énergie soit plus faible, leur fréquence d'apparition, à un niveau de tension donné, est nettement plus importante que celle des streamers négatifs.

Les claquages apparaissent également à des niveaux de tension plus faibles en polarité positive. Les traces de leur impact sur l'électrode plane montrent qu'ils suivent un chemin axial, de la pointe vers le centre de l'électrode plane, lorsque la polarité est positive. Par contre, en polarité négative, ils suivent une trajectoire plus longue reliant la pointe et le bord de l'électrode plane.

8- Fréquences des courants et des émissions lumineuses

L'analyse des fréquences des pics de courant et de lumière n'a fait l'objet que de quelques investigations. Les pics de courant et de lumière émise associés aux streamers positifs sont caractérisés par leur régularité alors que ceux correspondants aux streamers négatifs sont irréguliers. Une bonne corrélation entre les signaux de courant et d'émission lumineuse est généralement observée.

En dépit de cela et de la faible reproductibilité des signaux, l'application de la transformée rapide de Fourier (F.F.T) à ces signaux, montre une bonne reproductibilité des fréquences des pics relatifs à ces signaux qui sont peu affectés par la distance inter-électrodes 'd' ($1\text{mm} < d < 20\text{mm}$) et la polarité de la pointe. Elles sont par ailleurs très proches d'un liquide à l'autre.

Par ailleurs, les fréquences des pics de courant sont différentes de celles des pics de lumière. Sur les signaux de courant, nous avons relevé deux groupes de pics. Le premier groupe de fréquence 17MHz, apparaît en premier sur une durée allant de 2 à 20 μs . Il est suivi par un deuxième groupe de fréquence allant de 0.2 à 1MHz et dont la durée, généralement supérieure à celle du premier, est dépendante de la distance inter-électrodes et du niveau de tension appliqué.

Les signaux lumineux par contre, présentent trois groupes de pics. Le premier de fréquence 2MHz est suivi par un deuxième de fréquence située entre 0.2 et 1MHz. Ces groupes sont à des fréquences relativement faibles ; ils sont représentés par le pic de fréquence N°1 de la figure 52-b. Sur chacun des pics de ces deux groupes sont superposés des pics d'un troisième groupe, de fréquence 80 MHz représentée par le pic N°2 de la figure 52-b.

Nous remarquons ici que, contrairement aux pics du deuxième groupe, les premiers pics de lumière ne présentent pas la même fréquence que les courants associés. Nous n'avons pas enregistré d'équivalent en courant au troisième groupe de pics de lumière.

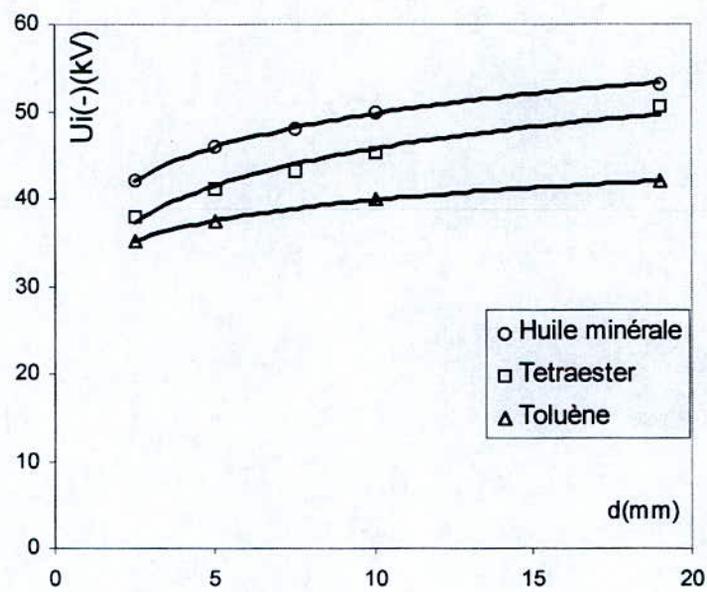


Fig. 51 : Tension seuil d'initiation ' U_i ' des streamers négatifs en fonction de la distance inter-électrodes ' d ' dans les trois liquides

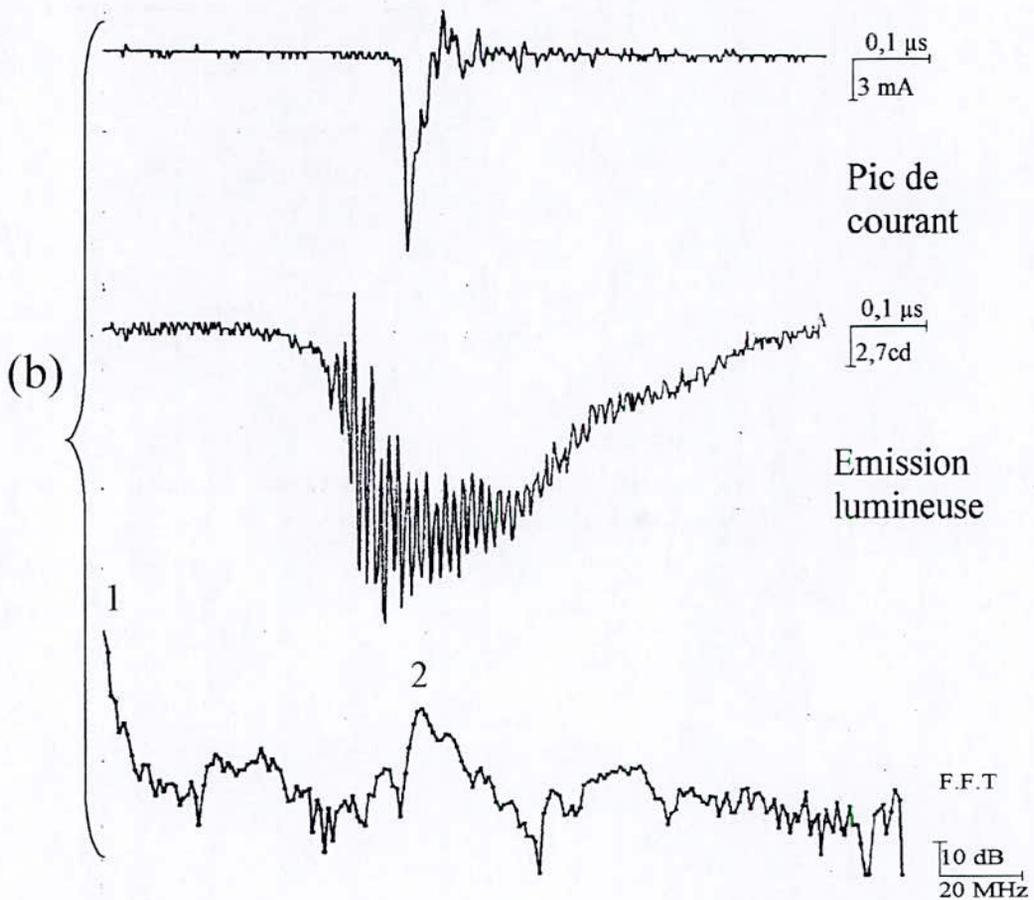
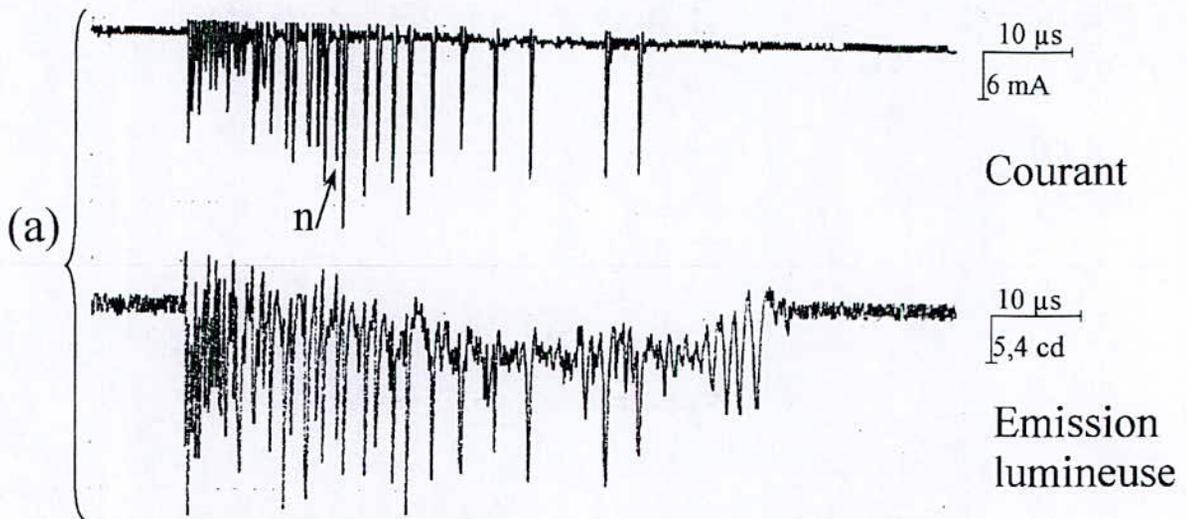


Fig. 52 : Courant et émission lumineuse correspondante et sa F.F.T dans l'huile minérale de transformateur en polarité négative. $U_- = 63\text{kV}$, $d=19\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$.

(a) : Totalité des signaux de courant et d'émission lumineuse.

(b) : Agrandissement du pic de courant 'n' et de l'émission lumineuse avec sa F.F.T.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence l'existence, sur une large gamme de tension, de courants et émissions lumineuses semblables en polarité positive et négative. Ils sont constitués de pics discrets et la charge correspondante évolue par sauts. Les vitesses des streamers correspondants devraient être du même ordre de grandeur.

Les seuils d'initiation et de claquage sont plus bas lorsque la polarité de la pointe est positive. Le claquage peut survenir lorsque la fréquence d'apparition dépasse les 5 streamers/min en polarité négative et 25 streamers/min en polarité positive.

Chapitre 5
DISCUSSIONS

Introduction :

Dans cette partie, nous allons tenter d'exploiter les résultats obtenus expérimentalement et montrer les corrélations pouvant exister entre les différents facteurs caractérisant les streamers.

Nous montrerons également qu'il est possible de déterminer la vitesse des streamers positifs à partir des oscillogrammes du courant correspondant.

Un modèle de propagation, basé sur les circuits RC, sera développé tant pour les streamers positifs que négatifs.

1- Evaluation de la vitesse par le temps au claquage

En général, le claquage a lieu lorsque le streamer parcourt toute la distance inter-électrodes; d'où la possibilité d'estimer la vitesse moyenne du streamer à partir des oscillogrammes de la tension appliquée [11,13,14,74], en considérant que le temps de génération est négligeable devant le temps de propagation. Cependant, lorsque la tension appliquée est suffisamment élevée, un ou plusieurs claquages peuvent survenir (fig.53). D'autre part, nous avons observé à des niveaux de tension relativement faibles, des claquages survenir quelques temps après l'arrivée du streamer sur le plan (fig.54). Ainsi, l'estimation de la vitesse de propagation des streamers par le temps de retard au claquage est donc incertaine du fait de la forte fluctuation de ce temps de retard [65].

Lorsque le streamer est rapide, il évolue de manière continue. Il est donc aisé d'étudier l'évolution du streamer à travers l'analyse des variations du signal de courant ou de lumière correspondant. La vitesse des streamers lents (généralement négatifs) est par contre difficile à évaluer à partir de ces signaux; les méthodes optiques de visualisation demeurent les plus correctes pour estimer la vitesse de tels streamers.

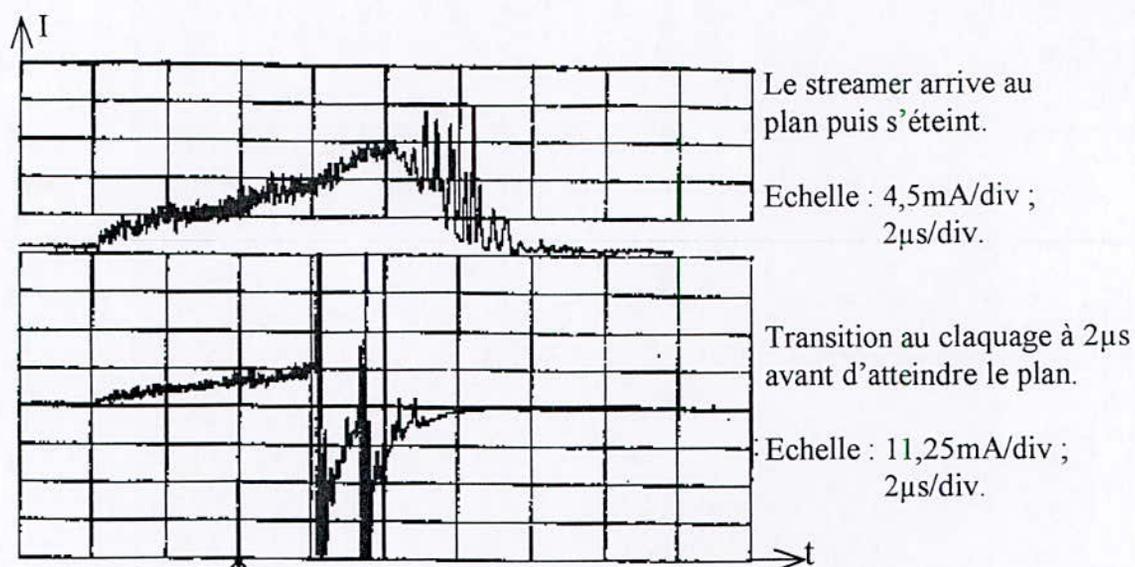


Fig. 53 : Courants de streamers positifs dans l'huile minérale,
d=12,5mm ; U=27kV.

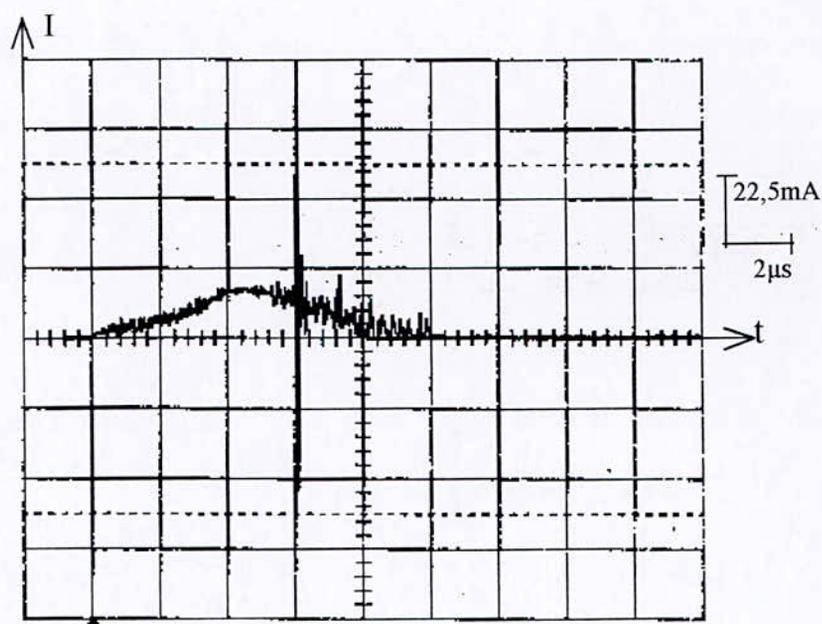


Fig. 54: Courant de streamer positif avec claquage à 1 μ s après
son arrivée sur le plan, dans l'huile minérale,
d=5mm ; U=23kV.

L'amplitude des signaux de courant enregistrés, correspondant aux streamers positifs, augmente dans le temps de façon continue jusqu'à atteindre une valeur maximale à l'arrivée du streamer sur l'électrode plane, pour ensuite marquer une décroissance relativement rapide correspondant à l'extinction du streamer.

Il nous est donc possible de déterminer la vitesse moyenne de tels streamers en faisant le rapport : $v = d/t_{\max}$ où 'd' est la distance inter-électrodes et ' t_{\max} ', le temps nécessaire au courant pour atteindre sa valeur maximale. Les vitesses obtenues à partir de ce rapport dans l'huile minérale, sont dans le même ordre de grandeur que celles mesurées par Torshin [17] à l'aide de méthodes optiques.

Les figures 55, 56 et 57, montrent l'évolution de ce rapport en fonction du niveau de tension appliqué, pour différentes distances inter-électrodes. Ce rapport varie peu avec la tension aux faibles distances inter-électrodes et tend à augmenter à des distances relativement élevées. Dans l'huile minérale, il est de l'ordre de 1.4 km/s à $U=24\text{kV}$ et passe à environ 1.9km/s pour une tension de 30kV.

D'autre part, la vitesse déterminée à partir de ce rapport est nettement affectée par la distance inter-électrodes. Elle est de l'ordre de 1.2km/s pour $d=5\text{mm}$; elle passe à 1.9km/s pour $d=12.5\text{mm}$ dans l'huile minérale. Dans le toluène, elle passe de 1km/s pour $d=2\text{mm}$ à plus de 6km/s à $d=18.5\text{mm}$. Cette croissance est cependant moins spectaculaire par rapport à ce qui a été observé dans l'air, le SF_6 et le polychlorobiphényle [15].

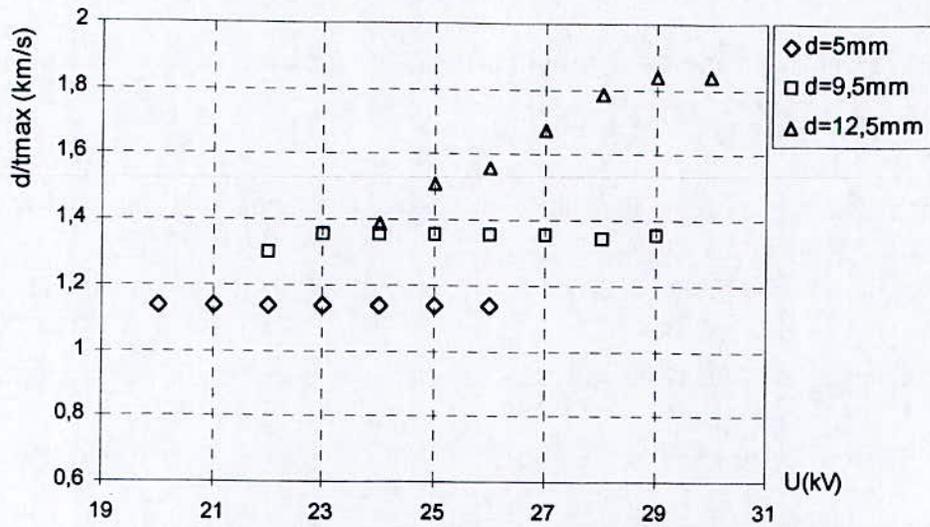


Fig.55 : Vitesses moyennes des streamers positifs dans l'huile minérale de transformateur en fonction du niveau de tension appliqué. Tension alternative.

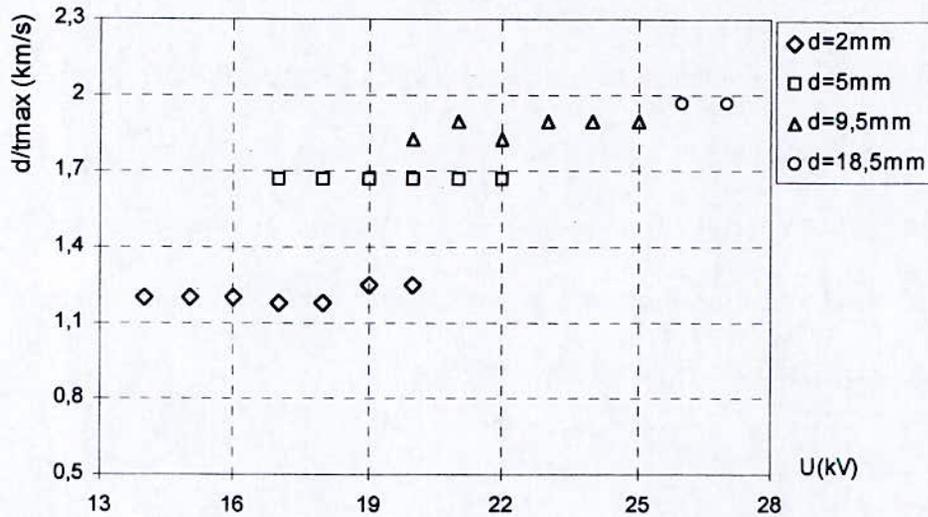


Fig.56 : Vitesses moyennes des streamers positifs dans le tetraester en fonction du niveau de tension appliqué. Tension alternative.

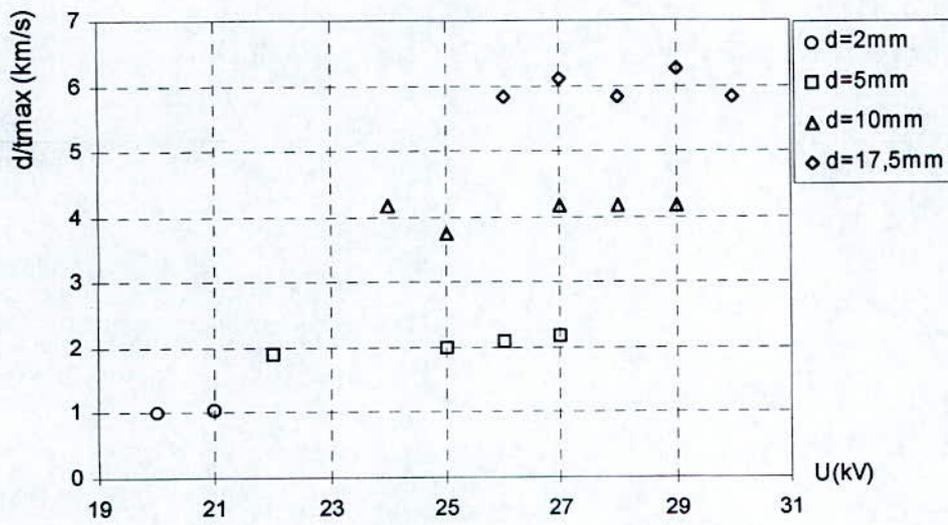


Fig.57 : Vitesses moyennes des streamers positifs dans le toluène en fonction du niveau de tension appliqué.
Tension alternative.

2- Corrélation courant - vitesse – champ électrique:

La corrélation entre les variations du champ harmonique et la vitesse des streamers, tant négatifs que positifs, a été établie pour plusieurs liquides par Beroual et Tobazéon [1].

Les expressions du champ harmonique E pour les différentes formes de streamers ont été déterminées dans des travaux antérieurs [1,62]. Dans le cas d'un streamer assimilé à une sphère tangente à la pointe (fig.58.a)

$$E = 2.E_a \cdot \frac{1}{x_r(1-x_r)} \quad (17)$$

avec $x_r = x/L$ et $E_a = U/L$, le champ moyen.

Afin d'éviter des confusions avec l'opérateur différentiel 'd', la distance inter électrodes sera représentée, dans ce qui suit par la lettre L .

On définit une variable réduite du champ $E_{rst} = E/E_{min}$, où E_{min} est la valeur minimale du champ ; d'où l'on obtient :

$$E_{rst} = 2 \cdot \frac{E_a}{E_{min}} \cdot \frac{1}{x_r(1-x_r)} \quad (18)$$

Lorsque le streamer est assimilé à une sphère concentrique (fig.58.b), l'expression réduite du champ sera :

$$E_{rsc} = \frac{E_a}{E_{min}} \cdot \frac{1}{(m+x_r)(1-m-x_r)} \quad (19)$$

où $m = r_p/L$

Pour un streamer assimilé à un filament cylindrique (fig.58.c), cette expression devient:

$$E_{rfc} = \frac{E_a}{E_{min}} \cdot \frac{1}{x_r \cdot \ln\left(\frac{1-m}{m+x_r}\right)} \quad (20)$$

Pour toutes ces formes de streamers, le champ est maximal sur la pointe et à proximité du plan (fig.59). Son minimum se situe aux alentours de la mi-distance du plan. D'après Chadband et Wright [75], le champ à la tête du streamer diminue graduellement avec la propagation de ce dernier, augmentant ainsi sa surface périphérique jusqu'à atteindre un minimum lorsqu'il aura parcouru environ 2/3 de l'intervalle inter-électrodes pour reprendre ensuite une croissance de plus en plus importante en s'approchant de l'électrode plane.

Les variations de la vitesse en fonction du temps ou de la distance inter-électrodes suivent la même allure que celles du champ [1,19,37,63]. Par conséquent, le champ électrique à la tête vive du streamer joue un rôle fondamental dans la propagation des streamers.

La composante continue des courants associés aux streamers positifs, augmente dans le temps en présentant un point d'inflexion aux alentours de $t_{\max}/2$, où t_{\max} est le temps correspondant à la valeur maximale de la composante continue du courant (fig.60). Cette courbe est bien décrite par une fonction polynomiale d'ordre 3 (fig.61).

La figure 62 montre de telles variations de la vitesse réduite le long de l'intervalle inter-électrodes pour un liquide (le cyclohexane) dans lequel la vitesse moyenne des streamers positifs [5] est comparable à celle enregistrée dans l'huile minérale [63].

Dans la figure 63, nous avons tracé les variations de $\left(\frac{dI}{dt}\right)_r$ par rapport au temps réduit dans le tétraester et l'huile minérale. Nous avons également rapporté sur la même figure, trois points de la vitesse réduite ' $v_r = v/v_{\min}$ ' mesurés dans l'huile minérale par Yamashita [63].

Les variations de $\left(\frac{dI}{dt}\right)_r$ et v_r montrent une bonne concordance entre ces variables, comme cela a été suggéré par Harrold pour la mesure des vitesses moyennes des streamers positifs dans les diélectriques liquides et gazeux [15].

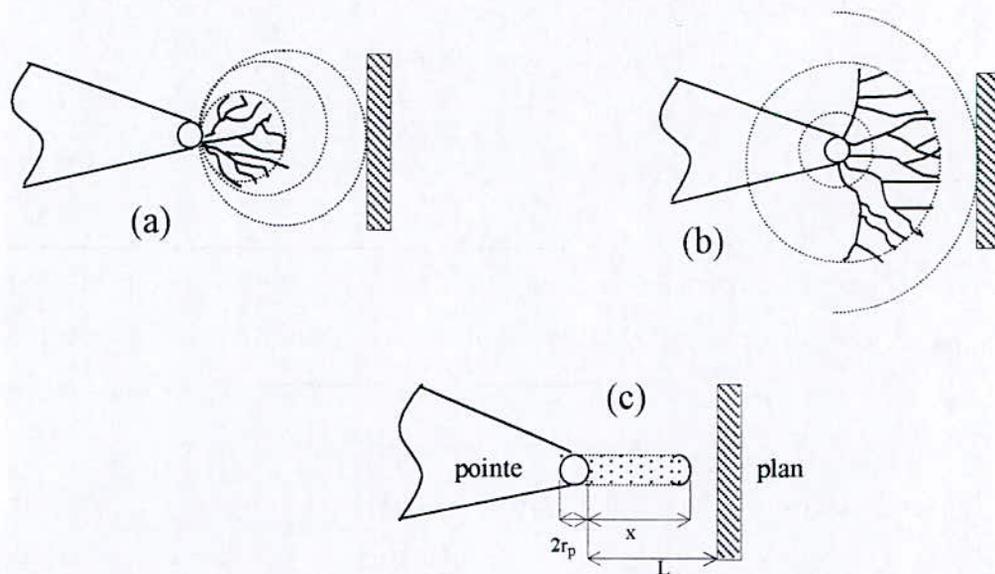


Fig.58 : Différentes formes de streamers.

- (a) Streamer assimilé à une sphère conductrice tangente à la pointe.
- (b) Streamer assimilé à une sphère concentrique à la pointe.
- (c) Streamer assimilé à un filament cylindrique conducteur.

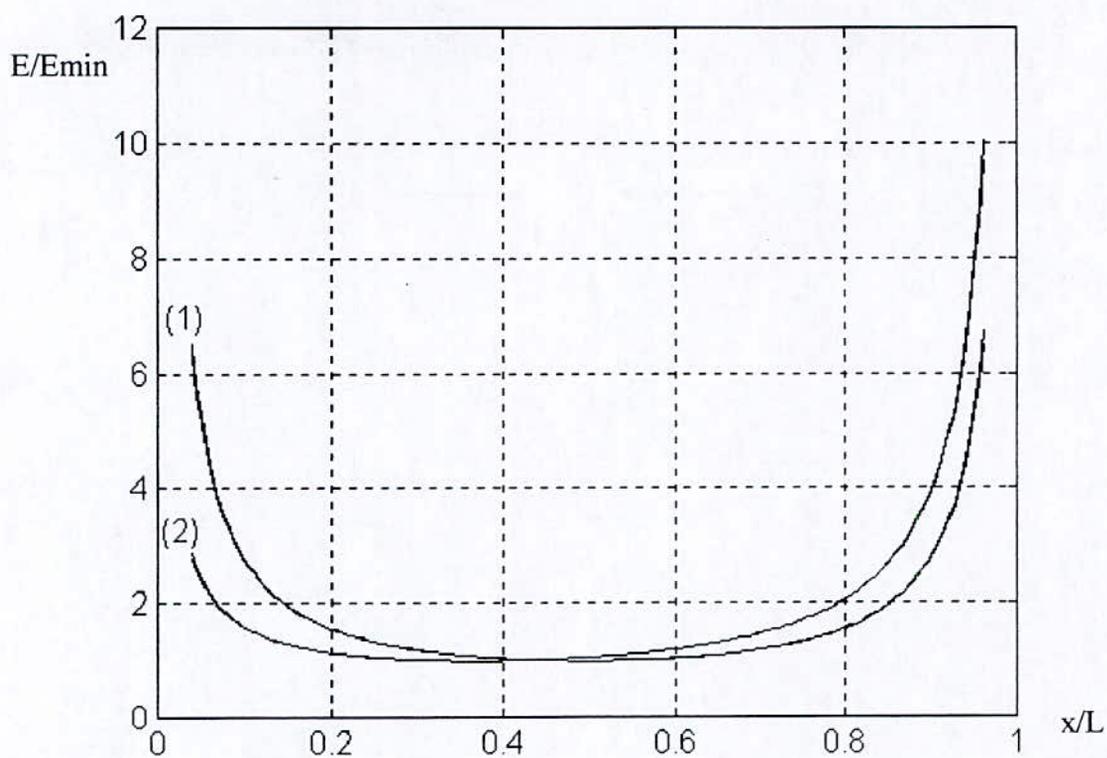


Figure 59: variations du champ harmonique en fonction de l'intervalle inter-électrodes.

$$U=27\text{kV} ; L=7\text{mm} ; r_p=10\mu\text{m}.$$

- (1) : sur une sphère conductrice tangente ou concentrique à la pointe.
- (2) : Sur un canal cylindrique conducteur.

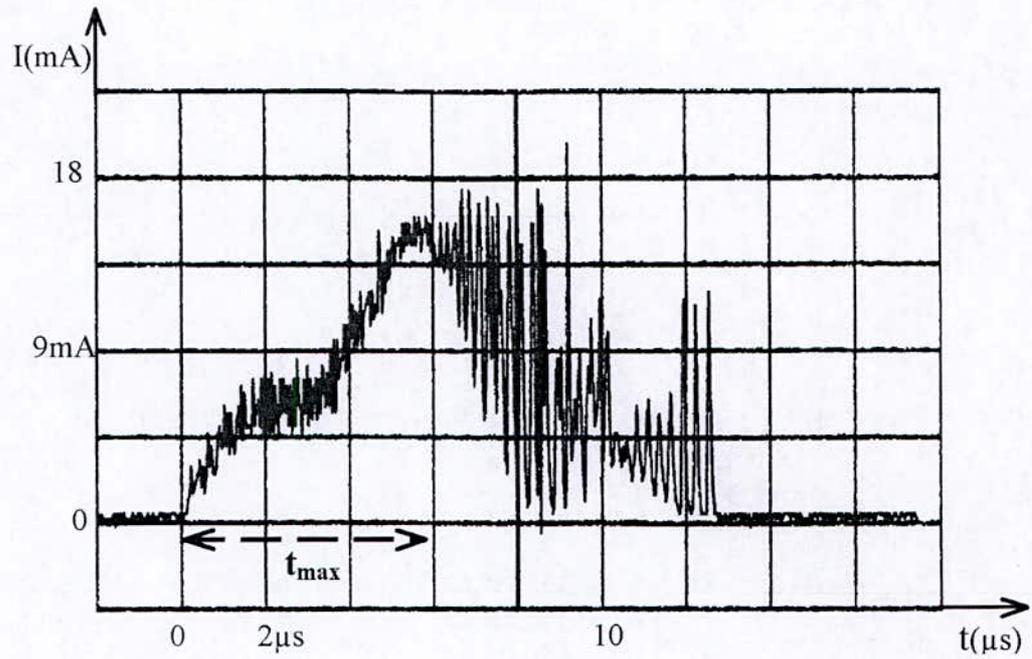


Fig.60 : Courant positif typique dans l'huile minérale
 $U=27\text{kV}$; $L=7\text{mm}$; $r_p=10\mu\text{m}$.

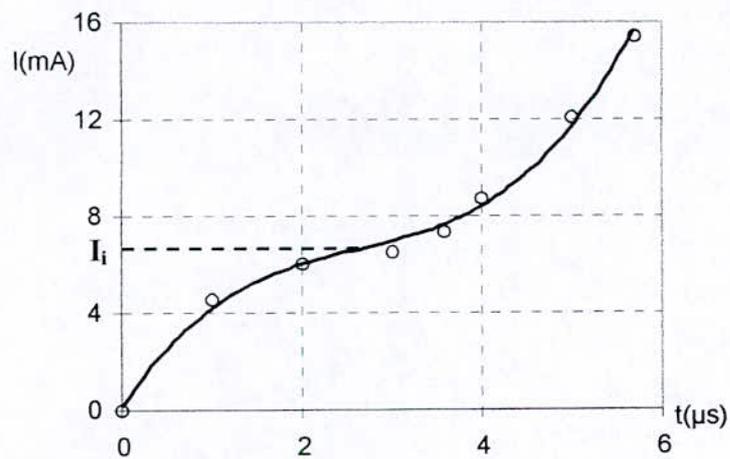


Fig.61: Fonction polynomiale approximant la composante continue du courant de la fig.60, durant la phase de montée ' t_{\max} '.

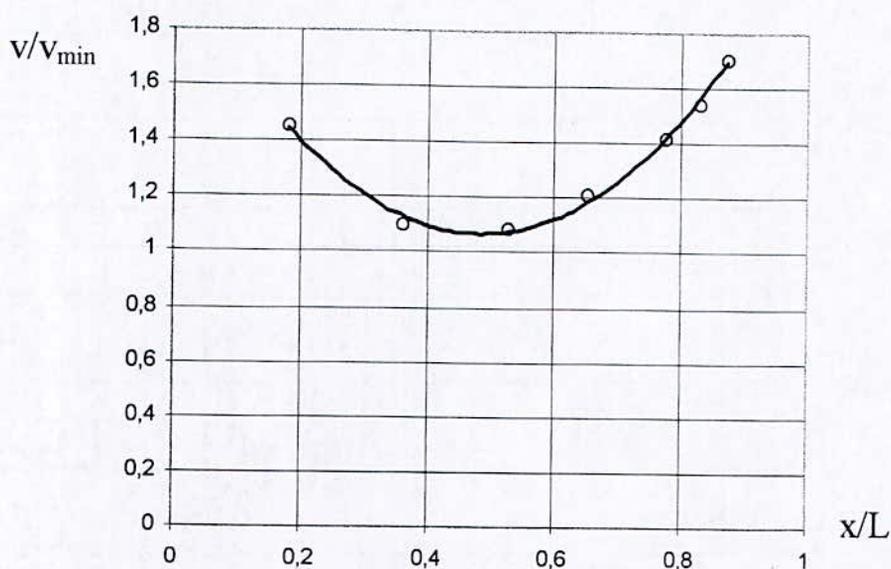


Figure 62: Vitesse réduite des streamers positifs en fonction de la distance réduite dans le cyclohexane d'après [19].
 $U=+40\text{kV}$, $r_p=3\mu\text{m}$, $L=4\text{mm}$.

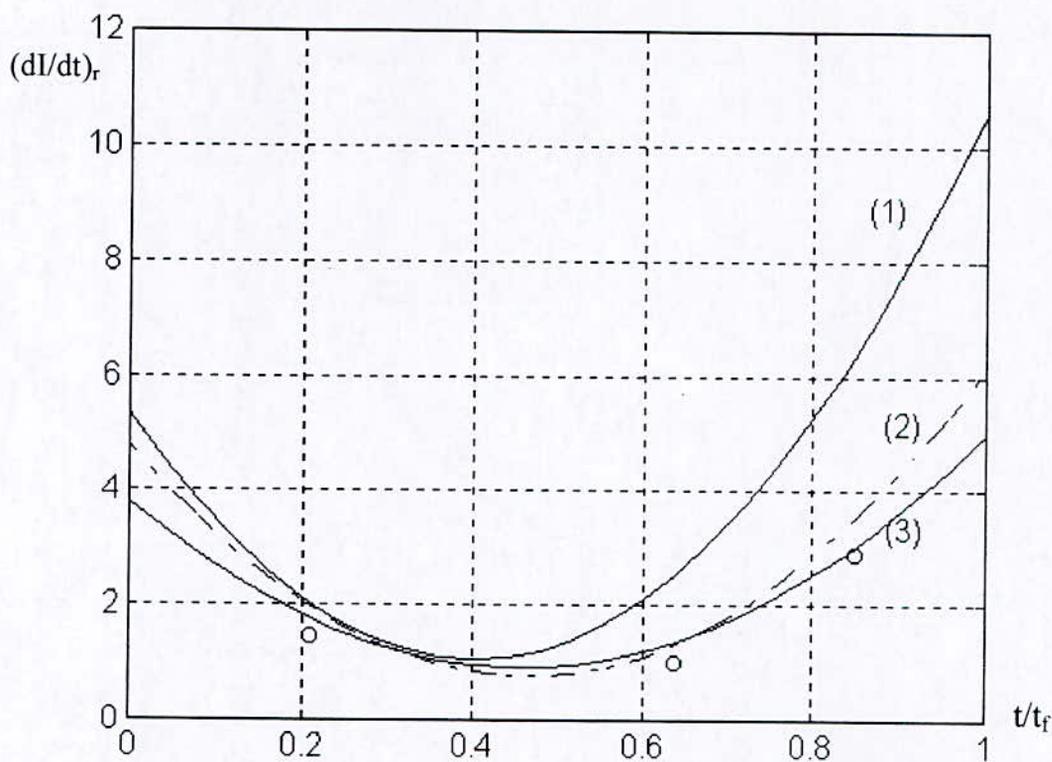


Figure 63: Variations de la valeur réduite de $(dI/dt)_r$ en fonction du temps réduit.
 $L=7\text{mm}$; $r_p=10\mu\text{m}$.

(1): dans le tetraester. $U=23\text{kV}$.

(2) : dans l'huile minérale. $U=27\text{kV}$ (courbe en tirets)

(3) : dans l'huile minérale $U=23\text{kV}$ (courbe en trait plein)

Les points circulaires représentent les variations de la vitesse réduite dans l'huile minérale, mesurées par Yamashita [63]. $U=28.4\text{kV}$, $L=4.5\text{mm}$, $r_p=20\mu\text{m}$

3- Modèle de propagation :

3.1- Courants et charges :

Nous considérons un système d'électrodes pointe-plan soumis à une différence de potentiel U . Lorsque cette dernière dépasse une certaine valeur, un streamer s'initie et se développe entre l'électrode acérée et le plan.

Cette propagation peut avoir lieu soit par sauts ou de façon continue tel que montré dans des travaux antérieurs [8,76]. Ceci dépend de l'énergie injectée dans l'intervalle inter-électrodes, de la géométrie du système, de la nature du liquide et de la forme de la tension appliquée. Le streamer peut revêtir une forme en buisson ou filamentaire.

La corrélation existant entre la forme du streamer, sa vitesse de propagation, la forme du courant (de la charge électrique) et de l'émission lumineuse dans plusieurs hydrocarbures liquides (purs ou contenant des additifs), a été montrée par ailleurs [1].

Il a été montré [8] que plus la conductivité du streamer est importante, plus vite il se propage. Par conséquent, la connaissance de la conductivité du streamer peut nous informer sur sa vitesse et les mécanismes responsables de sa propagation.

Dans ce qui suit, nous allons considérer que le streamer est constitué de N_b branches. Chaque branche est assimilée à un canal cylindrique de rayon r et de conductivité σ [52], représenté par une cellule RC (R et C étant respectivement une résistance et une capacité).

Le streamer peut être représenté par un circuit électrique équivalent [77] (figure 64), où R_0 et C_0 sont la résistance et la capacité du système sans présence de streamer.

La résistance R_0 de l'électrode de terre est estimée à 100Ω . La capacité C_0 a été mesurée à l'aide d'un analyseur d'impédance numérique (HP.4194A) à des fréquences proches des fréquences d'apparition des pics de courant allant jusqu'à 100MHz. Elle est de l'ordre de 1pF pour une distance de 20mm et de l'ordre de 2pF pour une distance inter-électrodes de 1mm. Le rayon de courbure de l'électrode pointe est de $10\mu\text{m}$ et l'électrode plane de terre (profilée selon Rogowski) a un diamètre de 39mm et une épaisseur de 9mm. Ces valeurs de la capacité sont par ailleurs proches pour les trois liquides que nous avons testés.

Les tensions considérées dans ce travail sont la tension continue et la tension alternative et, le niveau de tension appliqué au moment de la propagation du streamer est supposé constant. En effet, le temps de propagation des streamers lents est tout au plus de $60\mu\text{s}$ et, en considérant une tension efficace U à 50 Hz, celle-ci varierait au maximum de 2% durant toute la propagation du streamer.

La propagation du streamer correspond à la fermeture des interrupteurs S_i à travers une cellule élémentaire (fig. 65) engendrant ainsi un courant $I_i(t)$ donné par la relation suivante :

$$I_i(t) = \frac{V_i(t) - V_{i-1}(t)}{R_i(x)} \quad (22)$$

et
$$I_i(t) = C_i(x) \cdot \frac{dV_i(t)}{dt} \quad (23)$$

où x est la longueur axiale du streamer.

Par ailleurs, nous avons,

$$C_{i-1}(x) \cdot \frac{dV_{i-1}(t)}{dt} = I_{i-1}(t) - I_i(t) \quad (24)$$

En dérivant l'équation (22), on obtient

$$\frac{dI_i(t)}{dt} = \frac{1}{R_i^2(x)} \left[\left(\frac{dV_i(t)}{dt} - \frac{dV_{i-1}(t)}{dt} \right) R_i(x) - (V_i(t) - V_{i-1}(t)) \cdot \frac{dR_i(x)}{dt} \right] \quad (25)$$

Et en substituant les équations (22), (23) et (24) dans (25), on obtient :

$$\frac{dI_i(t)}{dt} = \frac{1}{R_i(x)} \left[I_i(t) \left(\frac{1}{C_i(x)} + \frac{1}{C_{i-1}(x)} \right) - \frac{I_{i-1}(t)}{C_{i-1}(x)} - I_i(t) \cdot \frac{dR_i(x)}{dt} \right] \quad (26)$$

L'équation de la charge électrique est donnée par l'expression :

$$Q_i(t) = \int_0^{t_{if}} I_i(t) dt$$

t_{if} est le temps de propagation de la branche i .

- Streamers négatifs :

La capacité de ces streamers peut être bien approximée par celle d'une sphère concentrique à la pointe, donnée par l'expression suivante :

$$C_i(x) = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \frac{(L + r_p)(x + r_p)}{(L - x)} \quad (27)$$

Sachant que le streamer évolue seulement du côté de l'électrode plane et, en négligeant r_p devant L , on obtient :

$$\frac{dC_i(x)}{dx} = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot f \cdot \left(\frac{L}{L - x} \right)^2 \quad (28)$$

L étant la distance inter-électrodes et f , un facteur tenant compte du fait que le streamer n'occupe pas totalement le volume d'une sphère dont l'angle solide est de 4π stéradians.

De plus, dans le cas d'une forme en buisson, le streamer est constitué d'un grand nombre de filaments cylindriques (fig.66) dont la résistance est donnée par l'expression suivante :

$$R_i(x) = \frac{x}{N_b \cdot \sigma \cdot \pi \cdot r^2} \quad (29)$$

Le système d'équations différentielles constitué des expressions (26) et (28) peut être résolu numériquement en utilisant la méthode de Runge-Kutta de 5ème ordre.

En utilisant les variables réduites,

$$C_{red} = C/C_0, R_{red} = R_i/R_0, I_{red} = I_i/I_{max}, x_{red} = x_i/L \text{ et } \epsilon_{red} = \epsilon/\epsilon_0.$$

Où I_{max} représente la valeur maximale du courant du streamer.

On obtient,

$$\left[\frac{dI_{i(red)}}{dx_{i(red)}} = \frac{L}{v \cdot R_0} \cdot \frac{1}{R_{i(red)}} \left[\frac{I_{i(red)}}{C_0} \left(\frac{1}{C_{i(red)}} + \frac{1}{C_{i-1(red)}} \right) - \frac{1}{C_0} \cdot \frac{I_{i-1(red)}}{C_{i-1(red)}} - \frac{v \cdot R_0}{L} \cdot \frac{R_{i(red)}}{x_{i(red)}} \cdot I_{i(red)} \right] \right] \quad (30)$$

$$\left[\frac{dC_{i(red)}}{dx_{i(red)}} = \frac{1}{x_{i(red)} \cdot (1 - x_{i(red)})} \cdot C_{i(red)} \right] \quad (31)$$

La résolution de ce système d'équations nous a permis d'obtenir les variations du courant et de la charge correspondante représentées dans la figure 67. La forme du courant ainsi obtenu est similaire à celles enregistrées expérimentalement dans les différents liquides. Les ordres de grandeur des amplitudes sont également proches.

Par manque de connaissances sur les paramètres physiques agissant sur les temps de retard entre deux impulsions de courant successives, nous avons fixé ce temps à une valeur constante proche de celles enregistrées expérimentalement au début de la propagation des streamers lents. Cette valeur est de l'ordre de $0.2\mu s$.

Les charges obtenues sont également de même forme et dans le même ordre de grandeur que celles enregistrées expérimentalement. Celles obtenues par simulation sont cependant légèrement inférieures aux valeurs expérimentales du fait que nous avons considéré un nombre de sauts

inférieur à celui ayant lieu effectivement lors de la propagation des streamers négatifs lents. Chaque saut du streamer s'exprime par une augmentation brusque de la charge globale.

- Streamers positifs :

En assimilant le streamer positif à un filament cylindrique conducteur, l'expression de la capacité en fonction de l'intervalle inter électrodes peut être exprimée sous la forme suivante :

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r_p}{\ln\left(\frac{L}{r_p + x}\right)} \quad (32)$$

d'où :

$$\frac{dC}{dx} = C \cdot \frac{L}{(r_p + x)^2 \cdot \ln\left(\frac{L}{r_p + x}\right)} \quad (33)$$

En posant $m = \frac{r_p}{L}$, cette expression devient en variables réduites,

$$\frac{dC_{i(\text{red})}}{dx_{i(\text{red})}} = C_{i(\text{red})} \cdot \frac{1}{(m + x_{i(\text{red})})^2 \cdot \ln\left(\frac{1}{m + x_{i(\text{red})}}\right)} \quad (34)$$

La résistance d'un tel streamer peut être exprimée par l'expression (29) en prenant $N_b=1$.

La résolution du système constitué des équations (30) et (34) nous a permis d'obtenir les variations du courant et de la charge correspondant à la propagation des streamers positifs le long de l'intervalle inter-électrodes. La figure 68 représente le courant et la charge pour un streamer positif dans l'huile minérale.

Les sections des canaux constituant les streamers sont fixées en conformité avec celles observées expérimentalement [5,17]. Torshin [17] a rapporté que la dimension des canaux constituant les streamers positifs rapides est plus importante sur la pointe que sur la tête vive du streamer. Leur rayon est de l'ordre de 48 à 50 μm (ce qui correspond à une section de $7.8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$) sur la pointe et de 3 à 10 μm à la tête vive du streamer (ce qui correspond à une section de l'ordre de 30 à $300 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$).

La dimension d'un saut élémentaire du streamer positif est de l'ordre de 0.2mm [78]. Ce saut a lieu dans une zone d'ionisation constituée d'environ 3 branches de faible section. Si le streamer évolue à une vitesse de 2km/s, le temps nécessaire à un saut serait de l'ordre de 0.1 μ s. Ainsi, dans ce travail, 100 itérations de calcul sont effectuées pour chaque saut du streamer ; ce qui correspond à une incrémentation du pas de calcul de 1ns. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle fixée par Fofana et Beroual [57].

Les paramètres fixés pour décrire l'évolution des streamers positifs rapides sont également suffisants pour les streamer négatifs lents. Les pics caractérisant les courants de tels streamers ont une durée minimale de 20ns (c.f. Chapitre 4) ; ce qui donne un minimum de 20 étapes de calcul pour chaque saut de streamer en prenant un pas de calcul de 1ns. Ceci représente également une valeur optimale pour le temps de calcul qui devient assez long pour des pas de calcul plus faibles.

Le fait de changer l'intervalle de temps entre deux impulsions successives, modifie la forme du courant. Cet intervalle est presque nul pour les streamers rapides alors qu'il est relativement important pour les streamers lents. Beroual [8] et Nakao et al. [23] ont rapporté que l'addition de certains additifs capteurs d'électrons peut augmenter la vitesse des streamers négatifs et les rendre filamenteux ; leur courant correspondant présentera une composante continue. L'addition de composants à bas potentiel d'ionisation augmente également la vitesse des streamers positifs. Ces additifs agiraient dans un cas comme dans l'autre sur le temps de création de nouvelles conditions de charge nécessaires à un prochain saut du streamer.

Le courant positif (fig. 68), obtenu avec $U=30\text{kV}$, $L=5\text{mm}$, $\epsilon_r=2.2$, $r_p=10\mu\text{m}$ et une conductivité $\sigma=5\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, présente une composante continue sur laquelle des pics sont superposés. Ce signal est similaire et dans le même ordre de grandeur que ceux caractérisant les streamers positifs rapides, enregistrés expérimentalement. Les pics de courant correspondent à un relais entre un saut élémentaire 'i' et un prochain saut. Le temps de retard entre un saut élémentaire 'i' et le saut suivant 'i+1' est de l'ordre de 10ns ; il est de 20 fois inférieur à celui caractérisant les sauts successifs des streamers négatifs lents.

La charge, quant à elle, évolue de manière quasi-continue. Sa valeur globale est dans l'ordre de grandeur de celles concernant les streamers positifs rapides enregistrés expérimentalement. Pour une tension appliquée de 30kV et une distance inter-électrodes de 5mm, la valeur globale de la charge est de l'ordre de 40nC.

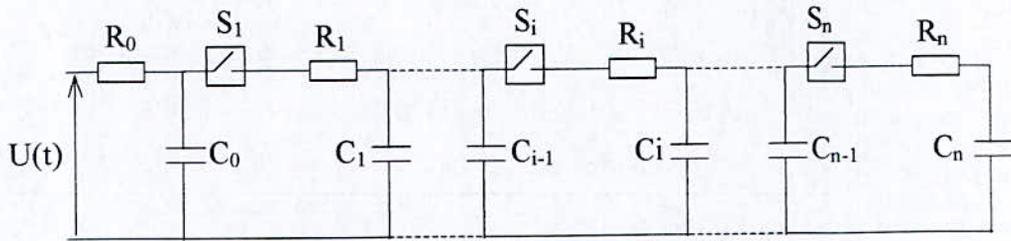


Figure 64: Modèle de circuit électrique représentant l'évolution du streamer.

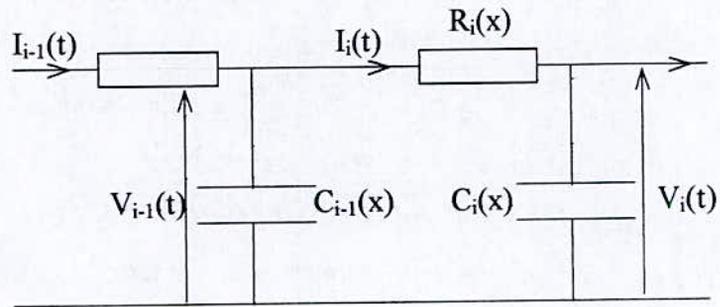


Figure 65: Cellule élémentaire.

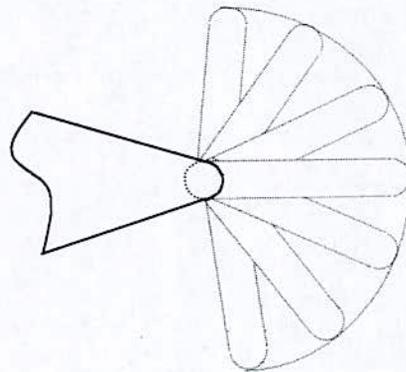


Figure 66 : modèle de streamer négatif prenant la forme d'une sphère concentrique à la pointe

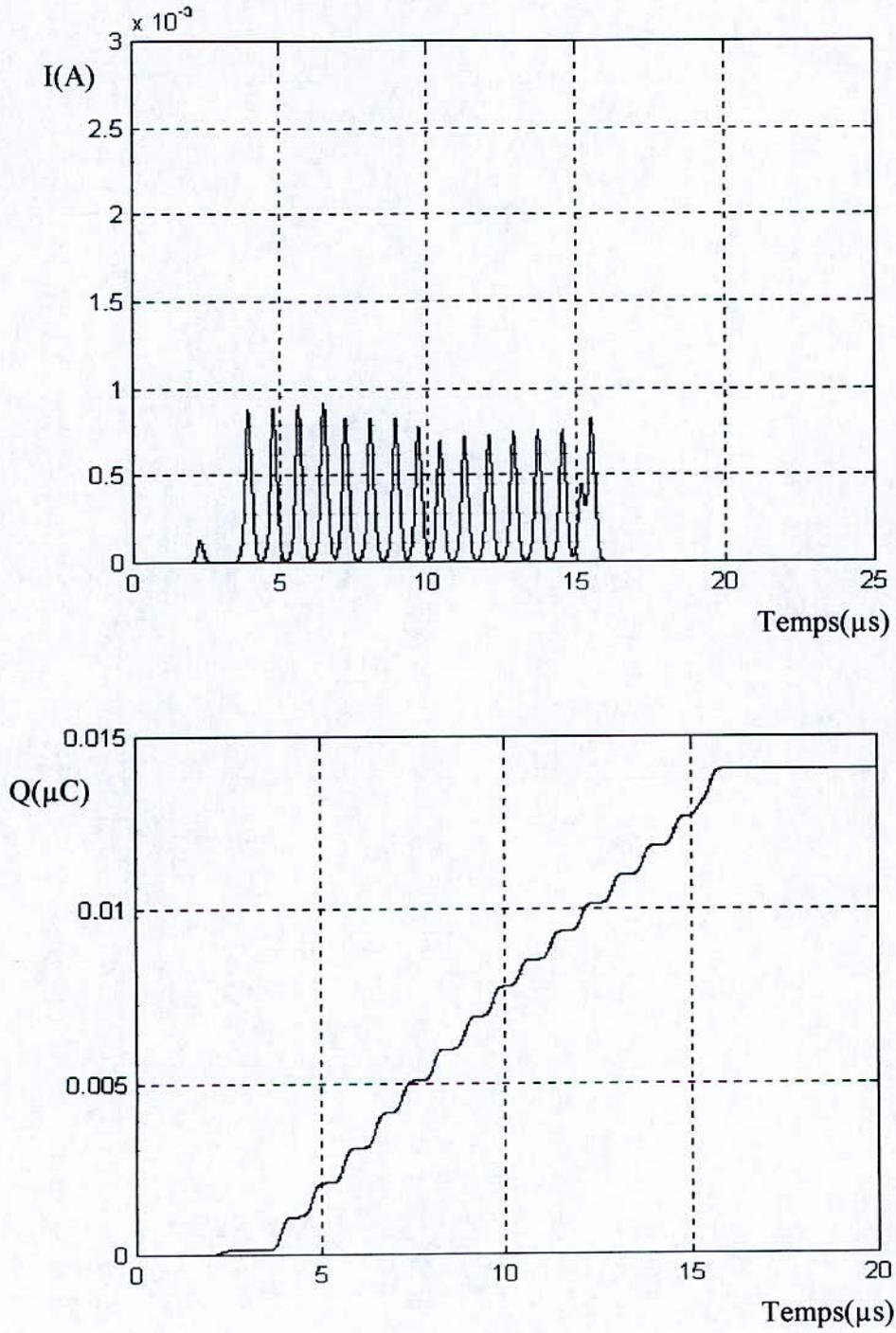


Figure 67 : Courant de streamer négatif lent (haut) et charge correspondante (bas)
 $L=5\text{mm}$, $U=20\text{kV}$, $r_p=10\mu\text{m}$, $\epsilon_r=2.2$ et $\sigma=5.10^{-6}\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$.

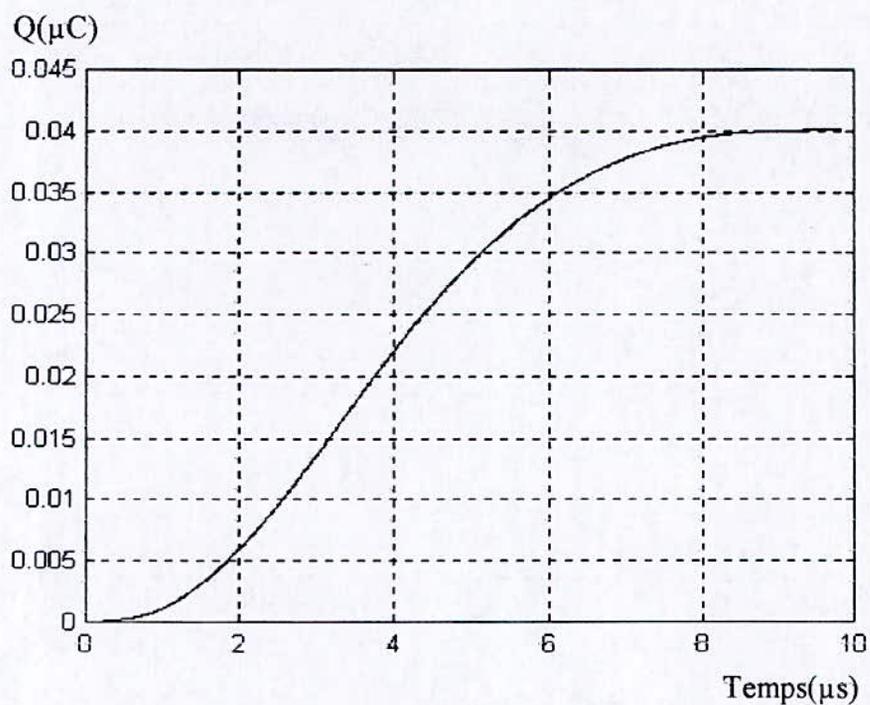
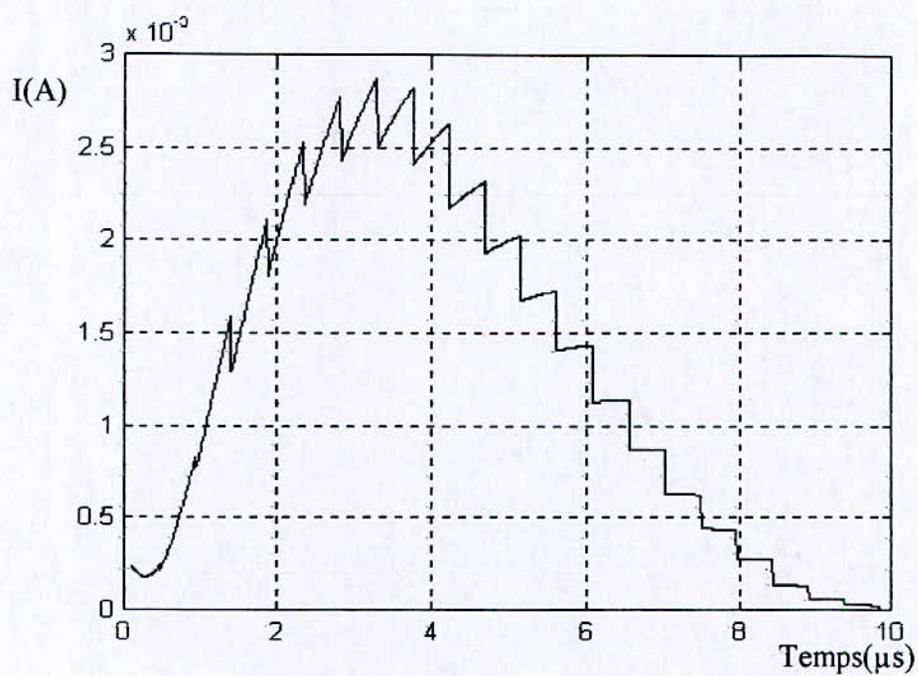


Figure 68 : Courant (haut) et charge (bas) correspondant à un streamer positif rapide.
 $L=5\text{mm}$, $U=30\text{kV}$, $r_p=10\mu\text{m}$, $\epsilon_r=2.2$ et $\sigma=5\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$,

3.2- Vitesse de propagation:

3.2.1- Streamer filamentaire

L'énergie électrique totale W_i disponible peut être dépensée sous plusieurs formes [8,52,76,79,80]. Soit W_c l'énergie cinétique nécessaire à agrandir une branche du streamer de distance dx_i . Ces deux énergies sont reliées par la relation:

$$W_c = \beta \cdot W_i. \quad (35)$$

Où $0 < \beta < 1$ a été définie (c.f. chapitre 1) comme étant la fraction de l'énergie totale mise en jeu dans la progression de la branche "i" d'une longueur dx_i .

Nous obtenons ainsi,

$$\frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot dx_i \cdot v_i^2(t) = \beta \cdot dW_i(t) \quad (36)$$

ρ étant la densité de la phase gazeuse constituant la branche "i"; r_i et v_i sont respectivement son rayon et sa vitesse de propagation. D'où,

$$v_i(t) = \left[\frac{2\beta}{\rho \cdot \pi \cdot r_i^2} \cdot \frac{dW_i(t)}{dx_i(t)} \right]^{1/2} \quad (37)$$

Aux hautes températures, tous les gaz peuvent être considérés comme parfaits. Sachant que le streamer est constitué d'une phase gazeuse dans laquelle des décharges partielles ont lieu, la température T dans le streamer est de l'ordre de la température d'ébullition du liquide considéré. La loi des gaz parfaits peut donc être appliquée :

$$pV = \frac{m}{M} \cdot A \cdot T$$

Où p , V , m , A , T et M sont respectivement, la pression, le volume, la masse du canal (branche), la constante des gaz parfaits, la température et la masse molaire du gaz contenu dans le canal.

En remplaçant la masse m par $\rho \cdot V$, on obtient :

$$\rho = \frac{M}{A} \cdot \frac{p}{T}$$

La pression à l'intérieur du streamer est considérée constante [24], par conséquent :

$$\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \frac{k}{T [^\circ\text{K}] \cdot A} \quad (38)$$

avec $k = M \cdot p$

d'où l'on obtient l'expression de la vitesse d'un streamer filamentaire :

$$v_i(t) = \left[\frac{2 \cdot A \cdot \beta \cdot T}{k \cdot \pi \cdot r_i^2} \cdot \frac{dW_i(t)}{dx_i(t)} \right]^{1/2} \quad (39)$$

Comme $dx_i(t) = v_i(t) \cdot dt$, on peut obtenir l'expression de la variation temporelle de la vitesse,

$$v_i(t) = \left[\frac{2 \cdot A \cdot \beta \cdot T}{k \cdot \pi \cdot r_i^2} \cdot \frac{dW_i(t)}{dt} \right]^{1/3} \quad (40)$$

$$\text{ou } v_i(t) = \left[\frac{2 \cdot A \cdot \beta \cdot T}{k \cdot \pi \cdot r_i^2} \cdot P_i(t) \right]^{1/3} \quad (41)$$

Où dt est l'intervalle de temps élémentaire entre deux étapes de calcul relatives à un élément de déplacement dx_i . Cette quantité doit être prise la plus petite possible pour une meilleure approche de l'évolution du streamer.

La puissance P_i et l'énergie W_i injectées dans l'intervalle inter-électrodes sont définies comme suit :

$$P_i = U_i \cdot I_i$$

$$\text{et } W_i = \sum_0^t U_i \cdot I_i \cdot dt$$

Avec $U_i = U - R_i \cdot I_i$, le potentiel à la tête de la branche i et I_i , le courant dû à cette branche.

Les figures 69 et 70 montrent un cas typique de variations temporelles de la puissance, de l'énergie et de la vitesse correspondant à un streamer positif rapide. La vitesse ainsi obtenue oscille autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 1500m/s en un temps de l'ordre de 3 μ s, pour une distance inter-électrodes de 5mm, où elle atteint l'électrode opposée pour ensuite décroître progressivement jusqu'à extinction totale du streamer. Cet ordre de grandeur de la vitesse a été

mesuré expérimentalement par Torshin [17] dans l'huile minérale de transformateur dans le cas de streamers positifs à faible probabilité de décharge. Ceci est également en accord avec nos estimations faites au Chapitre 5.1.

La conductivité du streamer, donc la densité de charge susceptible d'être créée en son sein, joue un rôle majeur quant à l'amplitude du courant, de la charge, de la puissance dissipée et de la vitesse de propagation de ce streamer. Ces derniers augmentent de manière très sensible avec la conductivité. La charge globale est multipliée par 3 lorsque σ passe de 5 à 6 $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$. Ce modèle prévoit une augmentation du courant, de la charge, de la puissance et de la vitesse des streamers positifs et négatifs lorsque la tension ou/et le facteur β ou et la section des branches sont augmentés ou/et la densité de la phase gazeuse constituant le streamer est diminuée. Par ailleurs, l'augmentation du nombre de sauts élémentaires engendre une augmentation du courant (charge), de la puissance (énergie) et de la vitesse. Cependant, la dimension d'un saut élémentaire est presque constante [78], d'où l'augmentation du nombre de sauts correspond à une augmentation de la distance inter-électrodes. Ceci est conforté par les observations expérimentales où les courants et les vitesses enregistrées en longues distances sont beaucoup plus importantes que celles enregistrées en courtes distances [5].

3.2.2- Streamer en buisson:

En considérant que sa forme globale est assimilée à une sphère grossissant de la pointe vers l'électrode plane [1,61], l'augmentation de volume correspondant à un saut du streamer passant de la longueur x_{i-1} à x_i serait $\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (x_i^3 - x_{i-1}^3)$. Et, l'équation (35) devient:

$$\frac{2}{3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot (x_i^3 - x_{i-1}^3) v_i^2(t) = \beta \cdot dW_i(t). \quad (42)$$

d'où l'on obtient :

$$v_i(t) = \left[\frac{3 \beta}{2 \rho \cdot \pi} \cdot \frac{1}{(x_i^2 + x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2)} \cdot \frac{dW_i(t)}{dx_i} \right]^{1/2} \quad (43)$$

avec $x_i - x_{i-1} = dx_i$

et $(x_i^3 - x_{i-1}^3) = (x_i - x_{i-1}) \cdot (x_i^2 + x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2)$

En substituant l'expression (38) dans (43) et sachant que $dx_i(t) = v_i(t) \cdot dt$, on peut obtenir l'expression temporelle de la vitesse. Ainsi,

$$v_i(t) = \left[\frac{3 A.T}{2 k.\pi} \cdot \frac{\beta}{(x_i^2 + x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2)} \cdot \frac{dW_i(t)}{dt} \right]^{1/3} \quad (44)$$

ou
$$v_i(t) = \left[\frac{3 A.T}{2 k.\pi} \cdot \frac{\beta}{(x_i^2 + x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2)} \cdot P_i(t) \right]^{1/3} \quad (45)$$

La fraction β de l'énergie totale convertie en énergie cinétique a été estimée dans des travaux antérieurs [8,12,57,76]. Elle est de l'ordre de $0.05 \div 0.2$. La valeur $\beta=0.10$ (c.f. Chapitre 1) a été trouvée assez plausible.

Dans les figures 71 et 72, nous avons représenté les variations temporelles de la puissance, de l'énergie et de la vitesse de propagation des streamers négatifs lents. Ces grandeurs sont nettement inférieures à celles caractérisant les streamers positifs rapides. Les vitesses ainsi obtenues oscillent entre une valeur minimale inférieure à 10m/s et une valeur maximale de l'ordre de 100m/s. Elles sont dans le même ordre de grandeur que celles mesurées expérimentalement [54,55].

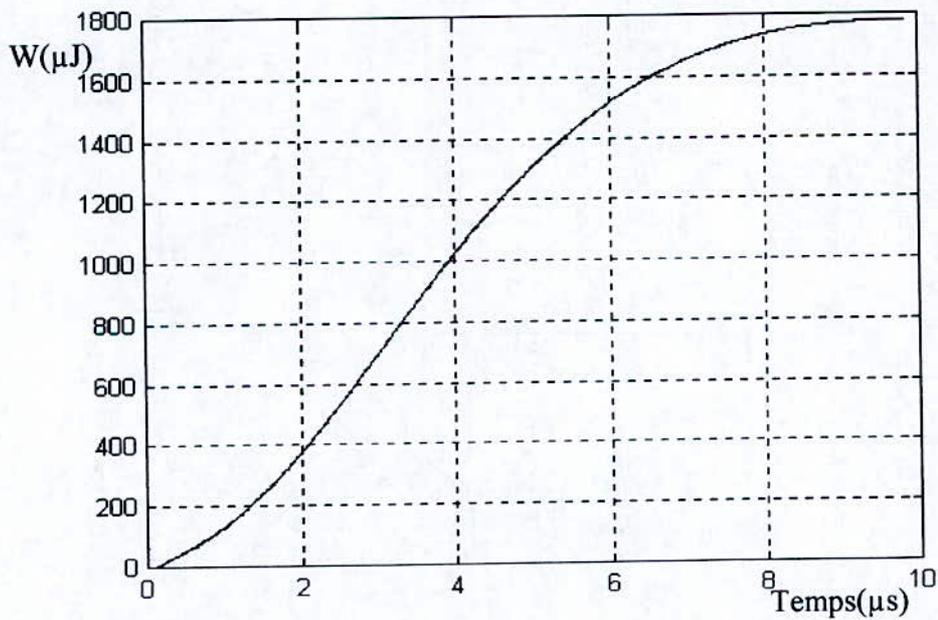
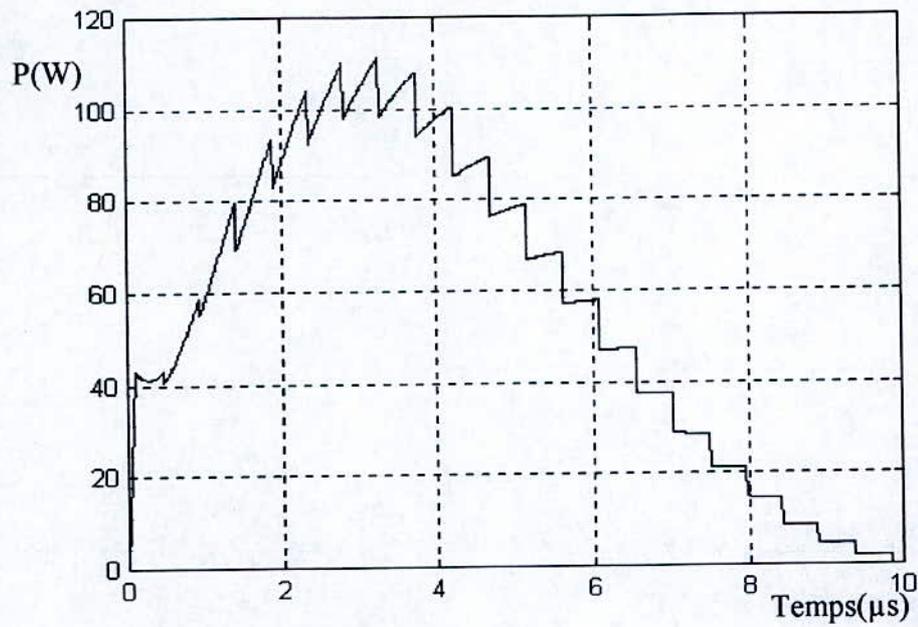


Figure 69 : Variations de la puissance et de l'énergie nécessaires au développement d'un streamer positif rapide.
 $\epsilon_r=2.2$, $L=5\text{mm}$, $U=30\text{kV}$, $r_p=10\mu\text{m}$, $\sigma=5\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$,

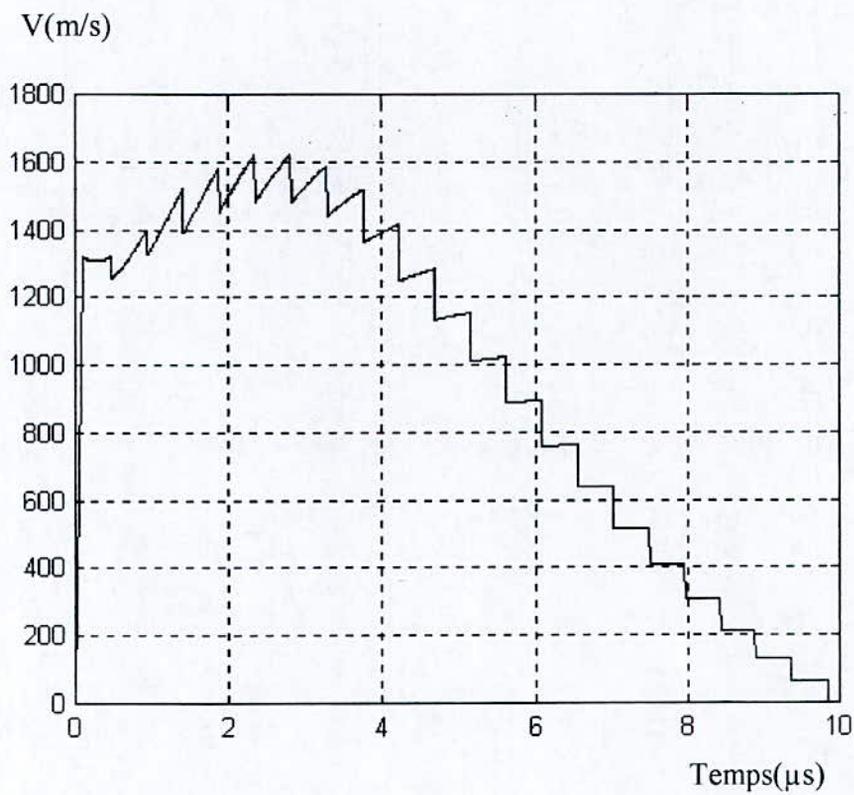


Figure 70 : Variations de la vitesse d'un streamer positif rapide, $L=5\text{mm}$, $U=30\text{kV}$, $r_p=10\mu\text{m}$, $\epsilon_r=2.2$ et $\sigma=5\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$,

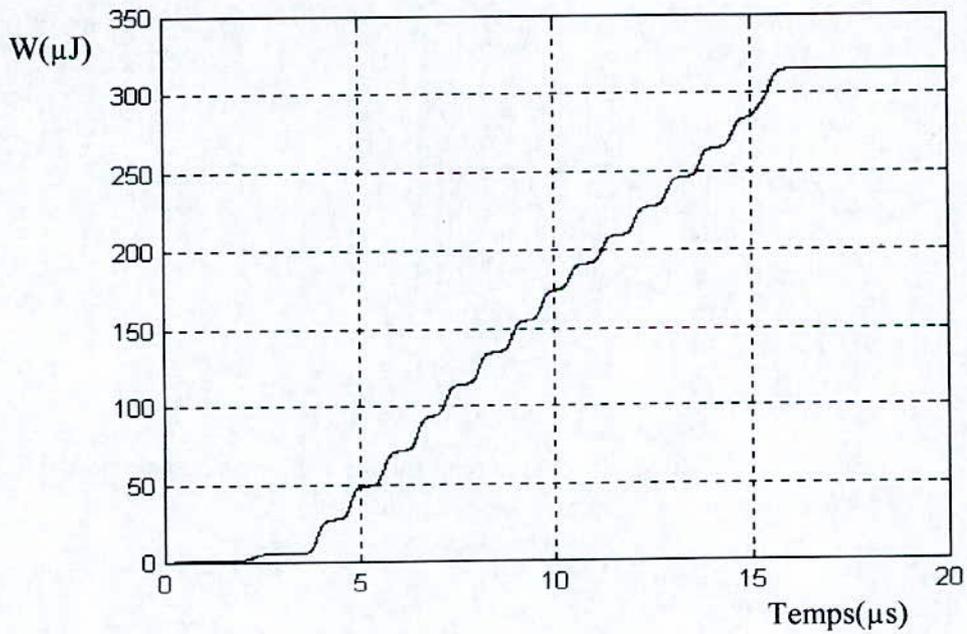
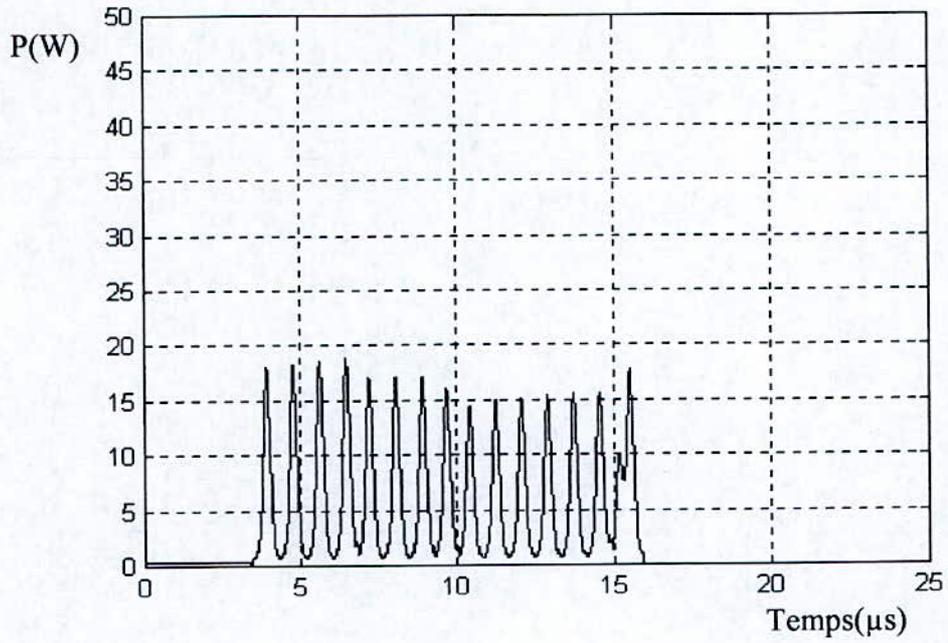


Figure 71 : Puissance (haut) et énergie (bas) correspondant à un streamer négatif lent.
 $L=5\text{mm}$, $U=20\text{kV}$, $r_p=10\mu\text{m}$, $\epsilon_r=2.2$ et $\sigma=5.10^{-6}\ \Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$.

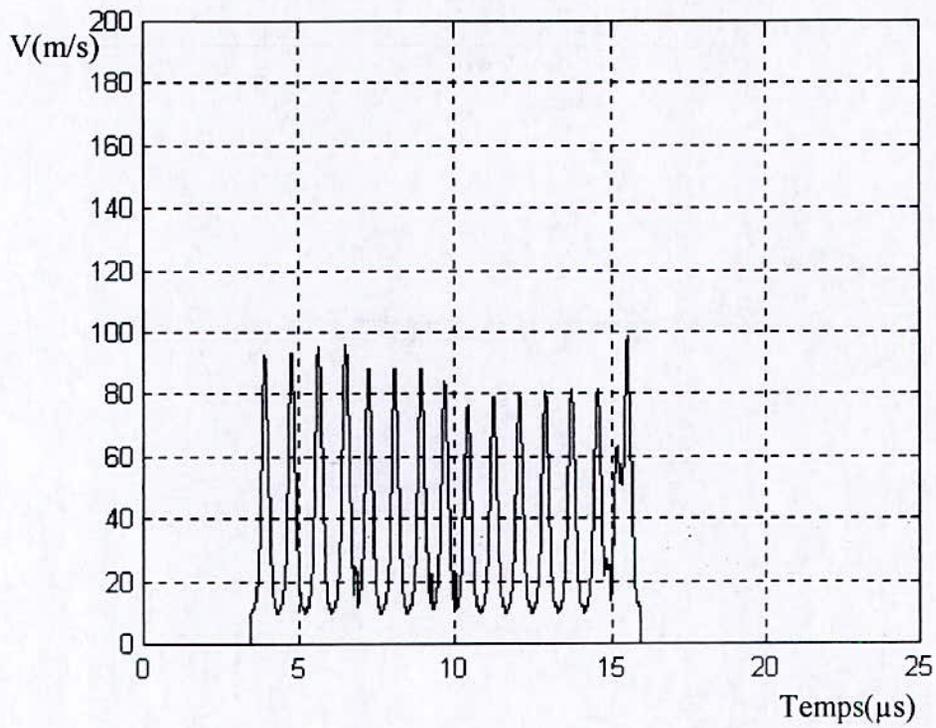


Figure 72 : Variations de la vitesse correspondant à un streamer négatif lent.
 $L=5\text{mm}$, $U=20\text{kV}$, $r_p=10\mu\text{m}$, $\epsilon_r=2.2$ et $\sigma=5.10^{-6}\ \Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$.

Conclusion :

L'estimation de la vitesse des streamers positifs rapides est possible grâce à l'analyse de l'évolution dans le temps des courants correspondant à ces derniers. Cependant, ce procédé devient relativement difficile lorsque des pics de forte amplitude et de grande fréquence viennent se superposer à la composante continue du courant. Ceci est le cas pour le toluène.

Les variations de la vitesse des streamers dans le temps et dans l'espace inter-électrodes, sont corrélées au champ électrique régnant à la tête vive de ce streamer. Cette corrélation existe également avec les variations de la dérivée du courant dI/dt .

Les mécanismes de propagation des streamers rapides et lents sont similaires. Ils se propagent tous deux par sauts. Le temps dépensé à réunir les conditions de décharge (champ, charge électrique...) entre une première impulsion et celle qui la suit, est déterminant quant au mode de propagation (par sauts ou pseudo-continue). La conductivité du streamer joue également un rôle similaire sur le mode de propagation et l'amplitude de la charge véhiculée par le streamer durant sa propagation.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail nous a permis d'apporter une contribution à la fois quantitative et qualitative sur l'influence de certains paramètres sur les caractéristiques des streamers (Courant, charge et émission lumineuse) dans un système d'électrodes pointe plan sous tensions alternative et continue.

Sous tension alternative, les courants et émissions lumineuses, aussi bien en polarité négative qu'en polarité positive, présentent des pics discrets pour la première polarité et superposés à une composante continue pour la deuxième, le long de la propagation des streamers ; ce qui indique que leur évolution s'effectue par sauts. La fréquence des pics qui se superposent sur la composante continue des streamers positifs (10 MHz) est plus régulière et plus importante que celle des courants négatifs (3 MHz) d'où, pour un intervalle de temps donné, le streamer positif effectue un nombre de sauts supérieur par rapport au streamer négatif, ce qui explique sa vitesse plus élevée. La forme et l'amplitude des courants et des émissions lumineuses sont dépendantes à la fois du niveau de tension appliqué, de la distance inter-électrodes et de la polarité de la pointe.

Quelle que soit la polarité de la pointe, une bonne corrélation relie généralement les courants et les émissions lumineuses correspondantes et, les grandeurs obtenues en polarité positive sont supérieures à celles obtenues en polarité négative. Excepté pour le toluène, la fréquence d'apparition des streamers positifs est également supérieure à celle des streamers négatifs.

Sous tension continue, les courants positifs et négatifs sont très semblables dans leur forme et assez proches en amplitude sur une large gamme de tension. Ils ressemblent ceux

observés en polarité négative sous tension alternative et sont tous deux constitués de pics discrets dont l'amplitude et la durée augmentent avec le niveau de tension appliqué.

Contrairement à la tension alternative, il arrive parfois, sous tension continue, d'enregistrer des impulsions de courant sans impulsions lumineuses correspondantes et des impulsions de lumière sans impulsions de courant correspondantes. Le fait qu'il y ait des impulsions de courant non accompagnées d'émissions lumineuses indiquerait que des phénomènes électrohydrodynamiques (EHD) sont impliqués dans l'expansion du streamer ; il y a progression du streamer (région de faible densité) sans qu'il y ait de décharge à l'intérieur de cette phase. Les émissions d'impulsions lumineuses non associées à des impulsions de courant seraient dues à des impuretés fluorescentes présentes dans le milieu.

Sous tension alternative, lorsque la fréquence d'apparition des streamers dépasse les 100 streamers/minute, leur propagation sera suivie de claquages du diélectrique. Alors que sous tension continue, des claquages peuvent avoir lieu lorsque cette fréquence dépasse les 5 streamers/minute en polarité négative et les 25 streamers/minute en polarité positive.

L'estimation de la vitesse des streamers rapides a été rendue possible à partir de l'analyse des signaux de courant correspondants. Elle est d'autant plus élevée que la distance inter-électrodes est augmentée.

Une bonne corrélation est trouvée entre les variations de la vitesse, du courant et du champ électrique à la tête vive du streamer. Ce dernier est un élément décisif quant à l'amplitude de la vitesse et du courant.

Le modèle présenté dans ce travail, décrit bien les variations du courant (charge), de la puissance (énergie) et de la vitesse de propagation aussi bien pour les streamers lents que pour les streamers rapides. Les processus fondamentaux responsables dans la création et la propagation sont similaires pour l'un et l'autre cas. Le nombre de charges et le temps nécessaire à leur création sont déterminants quant à la vitesse des streamers correspondants. Ce modèle montre que plus la conductivité du streamers est élevée donc plus la densité de charges créées en son sein est grande, plus faible sera sa résistivité et la chute de tension à ses bornes, plus important sera le champ électrique à sa tête vive et plus court sera le temps nécessaire à la création de nouvelles conditions de décharge d'où une vitesse de propagation plus importante.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] A. Beroual and R. Tobazeon, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol. EI-21, N°4, August 1986. pp.613-627.
- [2] P. Gournay and O. Lesaint, U.K. Journal Phys. D : Appl. Phys. 26 (1993) pp. 1966-1974.
- [3] A. Beroual and S. Bouazabia, Arch. Of Elect. Eng., No.3, pp.295-303, 1999.
- [4] S.J. Rzad, J.C.Devins and R.J.Schwabe, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.EI-14,1986, pp.289-295.
- [5] A. Beroual, M. Zahn, A. Badent, K. Kist, A.J. Schwabe, H. Yamashita, K. Yamazawa, M. Danikas, W.G. Chadband, and Y. Torshin, IEEE Study group, IEEE Elect. Ins. Magazine, Vol. 14, N°2, p.6, 1998.
- [6] J.C. Devins, S.J. Rzad and R.J. Schwabe, J. Appl. Phys., vol. 52(7), pp. 4531-4545, 1981.
- [7] P.Keith Watson, W.G. Chadband and M. Sadeghzadeh-Araghi, IEEE Trans. On Elect. Ins., Vol. 26 No.4, August 1991.
- [8] A. Beroual, Am. Journal of Appl. Phys., 73(9), 1 May 1993, pp.4528-4533.
- [9] T.J. Lewis, Conf. Rec. On the ICDL '96, 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [10] T.J. Lewis, IEEE Trans. on Diel. And Elect. Ins., Vol.1 No.4, August 1994, pp.630-643.
- [11] S. Sakamoto and H. Yamada, IEEE Trans. on Elect. Ins., EI-15, No 3, pp.171-181, 1980.
- [12] A. Beroual, Archives of Electrical Engineering, volume XLIV, N°4, pp.579-592, 1995.
- [13] J.C. Devins, S.J. Rzad and R.J. Schwabe, J. of Phys. D Appl. Phys., 9, p. L-87, 1976.

- [14] E.M. Hizal, Proc. VII Int. Conf. on Breakd. And Diel. Liq., Berlin 1981, p.187.
- [15] R.T. Harrold, Ann. Rep. CEIDP NAS-NRC, 1974, p123.
- [16] H.Yamashita, K.Yamazawa, W.Machidori and Y.S.Wang, Conf. Rec. of the ICDL '96, 12th Int. Conf. on Cond. And break. in Diel. Liq., Roma, Italy July 15-19, 1996. pp. 226-229.
- [17] Yu.V. Torshin, IEEE Trans. on Diel. and Elect. Ins., Vol.2 No1, 1995, pp.167-179.
- [18] H ;Yamashita, E.O.Forster and M.Pompili, IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.28, N°3, June 1993.
- [19] A. Beroual, Thèse de doctorat d'état es-sciences physiques, Grenoble, Janvier 1987.
- [20] P.J. McKenny and P.B. McGrath, IEEE Ann. Report CEIDP, pp.504-509, 1982.
- [21] A. Beroual et R. Tobazéon, Revue Phys. Appl., N° 22, 1987, pp. 1117-1123.
- [22] A.L. Wintenberg, M.O. Pace, T.V. Blalock and J.V. Foust, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.24 No1, 1989, pp. 67-72.
- [23] Y.Nakao, H.Itoh, S. Hoshino Y. Sakai and H. Tagashira, IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., Vol.1, N°3, June 1994. pp. 383-390.
- [24] K.L. Stricklett, C. Fenimore, E.F. Kelley, H. Yamashita, M.O. Pace, T.V. Blalock, A.L. Wintenberg and I. Alexeff, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.26 No.4, 1991, pp.692-698.
- [25] A.C.T. Briggs, A. Beroual and F. Buret, IEEE Int. Symp. On Elect. Ins., Baltimore USA, June 1992, pp. 423-426.
- [26] A.C.T. Briggs, A. Beroual and F. Buret, IEEE Trans. on Diel. and Elect. Ins., Vol.1 No.3, June 1994, pp. 371-376.

- [27] H. Yamashita and H. Amano, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.23, 1988, PP. 739-750.
- [28] H. Yamada, T. Murakami, K. Kusano and T. Sato, Conf. Rec. Of the 10th Int. Conf. on Cond. and Break. in Diel. Liq., IEEE No90CH2812-6, pp.410-414, 1990.
- [29] [55] W.G. Chadband, J. Phys. D : Appl. Phys., Vol.13, 1980, pp. 1299-1306.
- [30] A. Beroual, Archiwum Electrotech.,1/4, pp.57-64, 1992.
- [31] S. Ohgaki and N. Fujioka, 7th ISH, August 26-30, 1991, pp. 13-16.
- [32] J.C. Devins and S.J. Rzad, IEEE ANN. Rep., Conf. on Elect. Ins. and Diel. Phenom., 1982, pp.383-394.
- [33] H. Yamashita and H. Amano, J. of Electr., Vol.12, 1982, pp.383-394.
- [34] H. Moulai et A. Beroual, 11èmes Jour. Tunisiennes d'Electrotech. et d'Automat. No. ET9, Gabes, 1991.
- [35] H. Moulai et A. Beroual, 1^{ère} Conf. Nat. sur la H.T., Bejaia 1995, pp.139-143.
- [36] H. Moulai and A. Beroual, Arch. of Elect. Eng. (AEE), Vol.L, No.195, 1-2001.
- [37] L. Lundgaard, D. Linhjell, G. Berg and S. Sigmond, Conf .Rec. of the ICDL'96, 12th Int. Conf. on Cond. and Breakd. In Diel. Liq., Roma, Italy, July 15-19, 1996 pp. 175-180.
- [38] D. Linhjell, L. Lundgard and G. Berg, IEEE Trans. on. Diel. and Elect. Ins., Vol.1 No 3, June 1994, pp. 447-458.
- [39] N.G. Trinh and A. Saker, Conf .Rec. of the ICDL'96, 12th Int. Conf. on Cond. and Breakd. In Diel. Liq., Roma, Italy, July 15-19, 1996 pp. 287-291.

- [40] O. Lesaint, P. Gournay, A. Saker, R. Tobazeon, J. Aubin and M. Mailhot, Conf. Rec. of the ICDL'96, 12th Int Conf. on Cond. and Breakd. In Diel. Liq., Roma, Italy, July 15-19, 1996 pp. 251-254.
- [41] Y. Kamata and Y. Kako, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.15, 1980 , pp.18-26.
- [42] F.M.J. Mc Cluskey, A. Denat and O. Lesaint, IEEE Trans. on Diel. and Elect. Ins., Vol.1 No.3, June 1994, pp.377-382.
- [43] B.Badent, K.Kist and A.J.Schwab, Conf. Record of the I.C.D.L.'96 12th International Conf. on Cond. And Breakd. In Diel. Liquids, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [44] K. Yamazawa, K. Sigiura and H. Yamashita, Conf. Rec. Of the ICDL '96, 12th Int. Conf. on Cond. And break. in Diel. Liq., Roma, Italy July 15-19, 1996, pp.222-225.
- [45] K.C. Kao, IEEE, Trans. on Elect. Ins., EI-11, 1976, pp.121-128.
- [46] D.A.Hoch and J.P.Reynders, 7th International Symposium of High Voltage Engineering, Dresden, August 26-30, 1991.
- [47] P.B. McGrath and J.K Nelson, J. of Electrostatics (NL) 7, 1979, pp. 327-36.
- [48] H. Yamada and T. Sato, IEEE Trans. Elect. Ins., EI-20, 2, (1985), p.261.
- [49] A. Beroual, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 32, pp. 5615-5620, 1993.
- [50] P. Wong and E.O. Forster, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.17, pp. 203-220, 1982.
- [51] W.F. Schmidt, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol. 26 No. 4, pp.560-567, August 1991.
- [52] N. Felici, Journées d'études du CNRS, Grenoble 1986, pp.88-92.
- [53] P.K.Watson, IEEE Ann. Rep. Conf. on Elect. Ins. and Diel. Phen., pp.370-376, 1981.

- [54] P.K. Watson, M. Iqbal Qureichi and W.G.(Bill) Chadband, Conf. Rec. Of the ICDL '96 12th Inter. Conf. On Cond. And Breakd. In Diel. Liq., Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [55] M. Sadeghzadeh- Araghi, M.I. Qureshi, W.G. Chadband and P.K. Watson, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol. 26 No 4, 1991, pp.663-672.
- [56] L. Rosenhead, ed. Oxford, 1963, pp.137-150.
- [57] I. Fofana and A. Beroual, Jpn. J. of Appl. Phys., Vol.37, Part 1 No.5A, 1998, pp.2540-2547.
- [58] N. Dhahbi-Meghriche, A. Beroual and L. Krahenbuhl, J. of Appl. Phys., D. Appl. Phys., No.30, 1997, pp.889-894.
- [59] A. Beroual et R. Tobazeon, Journées d'études du CNRS, Grenoble 1986, pp.99-104.
- [60] Yu.V. Torshin, 7th Int. Symp. On High Volt. Engin., 1991, pp.17-20.
- [61] H. Moulai et A. Beroual, Alg. J. of Tech. (AJOT), No.9, 1993, pp.105-116.
- [62] H. Moulai, thèse de Magister, E.N.P., juin 1990.
- [63] H. Yamashita, IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.28, N°6, December 1993, pp. 947-955.
- [64] G. Massala, 3^{ème} Conf. des J.C.G.E., E.C.Lyon, Avril 1996, pp. 276-279.
- [65] C. Mazzetti, M. Pompili and E.O. Forster, IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.25, No.6, december 1990. pp. 1111-1116.
- [66] P. Rain, C. Boisdon, O. Lesaint and R. Tobazeon, , I.E.E.E. Trans. on Elect. Ins., Vol.26, N°4, August 1991, pp. 715-725.
- [67] O. Lesaint, P. Gournay and R. Tobazeon, IEEE tras. on elect. Ins., Vol.26 N°4, pp.699-707, August 1991.

- [68] H. Moulai et A. Beroual, 3^{ème} Conf. Nat. sur la H.T., Guelma 1999, pp.45-48.
- [69] P. Biller, Conf. Rec. Of the ICDL '96, 12th Int. Conf. On Cond. And Breakd. In Diel. Liq., pp.189-192, 1996.
- [70] H. Moulai et A. Beroual, 2^{ème} Conf. Nat. sur la H.T., Tizi Ouzou 1997, pp.71-74.
- [71] A. Beroual, C. Marteau and R. Tobazeon, IEEE Trans. on Elect. Ins. Vol. 23 N°3, June 1988, pp. 427-431.
- [72] G. Massala and O. Lesaint, Conf. Rec. Of the ICDL, 12th Int. Conf. on Cond. and Breakd. In Diel. Liq., Roma 1996, pp. 255-258.
- [73] P. Rain and O. Lesaint, IEEE on Diel. and Elect. Ins., Vol.1 No.4, August 1994, pp.692-701.
- [74] H. Yamada, T. Murakami, K. Kusano, T. Fujiwara and T. Sato, IEEE Trans. on Elect. Ins. Vol. 26, No.4, August 1991, pp. 708-714.
- [75] W.G. Chadband and G.T. Wright, Brit. J. Appl. Phys., Vol.16, 1965, pp.305-313.
- [76] A.Beroual and C.Brosseau, Ann. Rep., CEIDP. pp. 476-579, West Virginia, USA, 1995.
- [77] A. Beroual and I. Fofana, Conf. Rec. Of the ICDL 96', 12th Int. Conf. on Cond. and Breakd. In Diel. Liq., Roma, Italy, 1996, pp. 214-217.
- [78] Yu. Torshin, Conf. Rec. Of the ICDL, 12th Int. Conf. on Cond. and Breakd. In Diel. Liq., Roma 1996, pp. 230-233.
- [79] A. Beroual, Arch. Electrotech. Tom. XLII, 1-4, 1993, pp. 45-56.
- [80] A. Beroual and I. Fofana, Arch. of Elect. Eng., Vol. XLIX, No.1, 2000, pp.23-33.

ملخص :

هذا العمل يهدف إلى دراسة الظواهر السابقة لتسرب الكهربائي في السوائل العازلة في نظام رأس إبرة- مستوى تحت نوتر دائم أو متناوب . تقدم نتائج تهم كل ما يعني عن التيار والشحنة والإشعاع الضوئي الناتجة عن انتشار الشجيرات الموجبة والسالبة واكتفائها نحو التفرع. لقد درسنا مدى تأثير التوتر والمسافة بين القطبين على هذه الخصائص المميزة للشجيرات وقدمنا تحليلا للذبذبات التي تخص التيار والإشعاع الضوئي . كما درسنا أيضا تأثيرات تواتر ظهور كل نوع من هذه الشجيرات .

أخيرا سنناقش أهم النتائج المحصول عليها سابقا . تقدم خصوصا تقديرا للسرعة استنتاجا من زمن بلوغ التيار لقيمته القصوى وكذلك تم إيجاد ترابط بين التيار والسرعة والحقل الكهربائي. تقدم نموذج انتشار الشجيرات الكهربائية سواء كانت موجبة أو سالبة : هذا النموذج يكون مبني على منطق الدارات " م ذ " .

Résumé :

Ce travail porte sur l'étude des phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides dans un système d'électrodes pointe-plan sous tension continue ou alternative 50 Hz. Nous présentons des résultats d'une étude systématique relative aux courants, charges et émissions lumineuses associés à la propagation des streamers positifs et négatifs et à leur transition vers le claquage. L'influence du niveau de tension appliqué et de la distance inter-électrodes sur la forme et l'amplitude de ces caractéristiques sera étudiée et une analyse des fréquences des pics de courant et de lumière sera présentée. Nous étudierons également les variations des fréquences d'apparition de chaque type de streamer. Enfin, nous discuterons les résultats essentiels obtenus précédemment. Nous présenterons notamment une évaluation de la vitesse par le temps correspondant à la valeur maximale du courant et établirons une corrélation entre courant, vitesse et champ électrique. Un modèle de propagation des streamers tant négatifs que positifs, basé sur les circuits RC, sera présenté. Il comprendra le calcul du courant, de la charge, de la puissance, de l'énergie et de la vitesse correspondant à ces streamers.

Abstract :

This work is devoted to the prebreakdown phenomena in dielectric liquids in a point-plane arrangement under DC or alternating voltage. It presents some results concerning the current, charge and emitted light associated to the propagation of the positive and negative streamers and to their transition towards breakdown. The influence of the applied voltage level and of the electrode gap on the shape and the amplitude of these features will be examined and an analyze of frequencies of the current and emitted light pulses will be presented. We will also study the variations of the apparition frequencies of each type of streamer. Finally, we will discuss the previously obtained results. Notably, we will present an evaluation of the streamer velocity by the corresponding time to the maximal value of the current and will establish a correlation between current, velocity and electric field. A model of propagation as well for negative or positive streamers, based on RC circuits, will be presented. It will involve the calculation of the current, charge, power, energy and the corresponding velocities of these streamers.

Mots Clés:

- Electrotechnique -Haute tension -Liquides isolants
- Streamers sous tension continue et alternative
- Mesure des Courants de préclaquage et de claquage.
- Emissions lumineuses.
- Modèle de propagation des streamers.