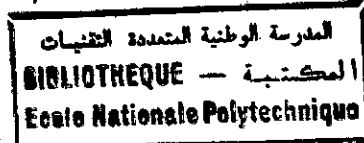


وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PHENOMENES DE GENERATION
DANS LES DIELECTRIQUES LIQUIDES SOUS TENSION
ALTERNATIVE 50Hz EN GEOMETRIE POINTE - PLAN

PROPOSE ET DIRIGE PAR :

Mr A. BOUBAKEUR

Mr S. BOUAZABIA

ETUDIE PAR :

Mr H. BESSAI

Mr M. ZOUAGUI

PROMOTION JUIN 1995

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PHENOMENES DE GENERATION
DANS LES DIELECTRIQUES LIQUIDES SOUS TENSION
ALTERNATIVE 50Hz EN GEOMETRIE POINTE - PLAN

PROPOSE ET DIRIGE PAR :

Mr A. BOUBAKEUR

Mr S. BOUAZABIA

ETUDIE PAR :

Mr H. BESSAI

Mr M. ZOUAGUI

PROMOTION JUIN 1995

DEDICACES

A ma très chère mère

A toutes les personnes que j'aime

Mustapha

A mon très chère père

A tous les miens

A tous mes amis

Hamza

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au laboratoire de haute tension de l'école nationale polytechnique d'Alger. Il a été effectué sous la direction de Monsieur A. BOUBAKEUR, maître de conférences et responsable du laboratoire de haute tension de l'ENP d'Alger et S. BOUAZABIA, chargé de cours à l'USTHB, qu'ils trouvent ici le témoignage de notre profonde gratitude pour leur aide précieuse, leur suivi constant et leurs encouragements soutenus qu'il n'ont cessé de nous prodiguer jusqu'à l'achèvement de ce travail.

Que Monsieur H. MOULAI, chargé de cours à l'USTHB, trouve ici l'expression de notre sincère reconnaissance pour l'intérêt qu'il a apporté à ce travail.

Nous remercions aussi les membres du jury pour avoir bien voulu estimer ce travail, ainsi que pour nous avoir fait l'honneur de leur présence à notre soutenance.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration et à l'accomplissement de ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I: Synthèse Bibliographique	3
Introduction	3
1 GENERATION DU STREAMER	4
1.1 Phénomènes électroniques	4
1.1.1 Dissociation et conductivité renforcée par le champ..	5
1.1.2 Création de charges à l'interface par des réactions électrochimiques	7
1.1.3 Conductivité en champ intense	8
1.1.3.1 Introduction	8
1.1.3.2 Emission et ionisation de champ	8
1.1.4 Courant limité par charges d'espace	9
1.2 Génération d'une cavité gazeuse	10
Introduction	10
1.2.1 Mécanismes thermiques	11
1.2.1.1 Modèle de Watson et Sharbaugh.....	12
1.2.1.2 Modèle de Kao	13
1.2.1.3 Modèle de vaporisation	13
1.2.2 Mécanisme de cavitation	14
- Théorie de Krasucki	15
- Modèle de cavitation	17
1.3 Influence des paramètres sur la tension de génération ..	18
1.3.1 Influence de la polarité de la tension et de la géométrie des électrodes	18
1.3.2 Influence de la nature du liquide	18
1.4 Détermination du temps de génération	18
1.4.1 Méthode de Von loue	18
1.4.2 Méthode de variation de r_p	19
1.4.3 Méthode de variation du temps de montée de la tension.....	19

2 PROPAGATION DES STREAMERS	21
2.1 Etude des streamers	21
2.1.1 Forme des streamers	21
2.1.2 Vitesse des streamers	21
2.1.3 Distribution des vitesses des streamers	22
2.1.4 Formes des courants et émission lumineuse	23
2.1.5 (.....) streamers	24
2.2 Influences des paramètres	25
2.2.1 Influence de la tension	25
2.2.2 Influence de la distance inter-électrodes	25
2.2.3 Influence du rayon de courbure de la pointe	26
2.2.4 Influence du métal des électrodes	26
2.2.5 Influence de la structure du liquide	27
2.2.6 Influence des additifs non ioniques	28
2.2.6.1 Additifs capteurs d'électrons	28
2.2.6.2 Additifs à bas potentiel d'ionisation	28
2.2.7 Influence des additifs ioniques	29
2.3 Modèles d'évaluation des vitesses	30
2.3.1 Modèles de Watson	30
2.3.2 Modèle de Krasucki	32
2.3.3 Modèle de Felici	33
2.3.4 Modèle de Devins, Rzad et schwabe	34
2.3.5 Modèle de Béroual et Tobazéon	36
3 INFLUENCE DE CERTAINES PROPRIETES DES LIQUIDES	42
3.1 Influence de la viscosité	42
3.2 Influence de la masse volumique	43
4 INFLUENCE DES VARIABLES D'ETAT	44
4.1 Influence de la pression	44
4.2 Influence de la température	45
5 CONCLUSION	45
CHAPITRE II: Techniques expérimentales	46
II.1 Source de tension	46
II.2 Cellule d'essais	46

II.3 Dispositif de mesure de courant	46
II.4 Visualisation des perturbations.....	49
II.5 Liquides restés.....	49
II.6 Mode opératoire	50
CHAPITRE III: Resultats et interprétation.....	51
III.1 Présentation des resultats.....	51
III.1.1 Introduction	51
III.1.2 Caractéristique courant-tension.....	51
III.1.3 Détermination de la tension de génération	51
III.1.4 Influence de la distance inter-électrodes sur la tension et le courant de génération.....	54
III.1.5 Influence de la nature du liquide.....	61
III.1.6 Tension de mouvement du liquide	63
III.2 Discussion et interprétation des resultats	67
III.2.1 Nature physique de la perturbation.....	67
III.2.2 Effet du champ électrique.....	68
III.2.3 Influence des caractéristiques physico-chimiques des liquides	72
III.2.4 mouvement du liquide.....	73
PERSPECTIVES.....	76
CONCLUSION GENERALE.....	77
ANNEXE.....	

... la température d'ébullition.

NOMENCLATURE

... et de la phase liquide.

- A : terme indépendant du champ.
- A(V) : pente de la caractéristique $t_{ap} = f(t_R)$.
- C_p : chaleur spécifique.
- d : distance inter-électrodes.
- e : charge de l'électron.
- E : champ électrique.
- E(R) : champ électrostatique sur le front de la sphère conductrice.
- J_1 : fonction de Bessel d'ordre 1.
- K_d : constante de vitesse de dissociation.
- K_r : constante de vitesse de recombinaison.
- L_i : énergie d'ionisation des molécules.
- L_v : chaleur latente de vaporisation.
- L' : énergie totale de vaporisation et de décomposition.
- N : nombres de mûles de vapeur générées.
- n_0 : concentration des ions dissociables.
- n_+ : concentration des ions positifs.
- n_- : concentration des ions négatifs.
- P : pression.
- p_e : pression appliquée dans le liquide.
- p_h : pression hydrostatique.
- p_{em} : pression électromécanique.
- p_s : pression due à la tension superficielle.
- qV_i : énergie d'ionisation par unité de temps.
- R : constante des gaz parfaits - rayon de la bulle.
- R_0 : rayon initial.
- R_m : rayon moyen de la bulle.
- t : temps.
- t_g : temps de génération.
- t_p : temps de propagation.
- t_{ap} : temps d'apparition de la perturbation.
- t_R : temps de montée d'une tension.
- T_{eb} : température d'ébullition.
- T_{amb} : température ambiante.

INTRODUCTION :

Les processus de claquage se produisant dans les diélectriques liquides ont été longtemps assimilés à ceux régissant les décharges dans les gaz et les solides.

Ainsi, plusieurs chercheurs ont essayé d'apporter les théories proposés pour les solides et les gaz pour interpréter les phénomènes électriques qui interviennent dans les liquides.

Actuellement, on considère qu'avant le claquage proprement dit, où se développe l'arc, il existe une période de préclaquage comprenant elle même deux phases:

- une phase de génération pendant laquelle se créent les circonstances favorables à l'apparition de l'étape suivante.

- une phase de propagation de la perturbation précédemment créée.

Deux hypothèses se présentent en faveur de l'étude du claquage:

- Le claquage résulterait d'une multiplication électronique par choc susceptible d'entraîner la génération d'une phase gazeuse.

- La phase gazeuse se forme en premier lieu (toutes sortes de mécanismes sont possibles), elle s'allonge sous l'effet du champ, s'ionise et donne lieu au claquage. Ainsi la formation de bulles gazeuses peut résulter d'une réaction électrochimique, de la cavitation produite par le mouvement électrohydrodynamique dû à la force de Coulomb, de la vaporisation du fluide par échauffement local, de l'existante localisée d'un streamer et d'autres mécanismes, en outre la présence de la charge spatiale peut provoquer des renforcements locaux du champ électrique susceptible de conduire au claquage.

L'objet de notre travail est d'apporter certains éléments de réponse quant aux mécanismes de génération, à partir d'une étude

systématique du comportement de plusieurs types de liquides de structure chimique simple sous tension alternative 50 Hz en géométrie pointe-plan.

Dans le premier chapitre, nous rappelons les différents résultats rapportés par d'autres chercheurs concernant la phase de propagation et de génération dans les diélectriques liquides.

Nous exposons dans le second chapitre les différentes techniques expérimentales que nous avons utilisées.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus sur l'influence des divers paramètres sur la tension et le courant de génération sous tension alternative, suivis d'une discussion des mécanismes intervenant durant cette phase. Nous terminons notre travail, par une liste de travaux susceptible d'améliorer ou de compléter nos résultats, ainsi que d'une conclusion générale.

CHAPITRE I

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.GENERATION DU STREAMER:

Le mécanisme de génération constitue une étape importante vers l'interprétation du claquage. D'après les résultats publiés dans la littérature, deux théories ont été proposées pour expliquer cette phase de génération, l'une purement électronique et l'autre relative à la formation d'une cavité gazeuse [1] sous l'influence des phénomènes électriques (conduction, injection), électrohydrodynamiques (mouvement du liquide), optique (émission lumineuse) et électrochimiques entraînant au voisinage de l'électrode pointe une perturbation de la forme arborescente au bout d'un certain temps t_g (temps de génération).

Sur le plan expérimental, nous possédons peu d'informations sur cette phase contrairement à la phase de propagation.

1.1 Phénomènes électroniques:[1-2-3]

Les nombreuses études sur la conduction électrique des liquides diélectriques ont permis d'établir que, dans les liquides polaires, la croissance rapide du courant avec le champ électrique est due, dans la plupart des cas, à la création d'ions aux électrodes par des réactions électrochimiques.

Dans les liquides non polaires, l'origine des porteurs, lorsque le courant se met à croître rapidement, dépend du degré de pureté du liquide et du champ électrique appliqué. Lorsque le liquide contient des impuretés électrolytiques, le processus de création est maintenant bien connu.

Suivant la nature de ces impuretés, le mécanisme mis en jeu est soit la dissociation en volume renforcée par le champ selon le modèle d'Onsager, soit l'injection à l'interface métal/liquide où les ions sont extraits, par le champ, d'un "réservoir", constitué à la suite de réactions électrochimiques. Dans ce cas, le champ pour lequel on observe une croissance très rapide du courant ne dépasse pas quelques centaines de kilovolts par centimètre.

Pour les liquides exempts de toute trace d'impuretés, c'est à dire dans lesquels il n'existe pas de "réservoir" d'ions sur les électrodes, il faut appliquer des champs beaucoup plus élevés (>1 MV/cm) pour observer le même phénomène de croissance très rapide de courant. Dans ce cas, les seuls mécanismes de création de charges envisageables font intervenir l'émission d'électrons à la cathode par effet de champ du liquide et/ou l'ionisation des molécules du liquide par chocs électroniques.

1.1.1 Dissociation et conductivité renforcée par le champ:[4]

La conduction est régie par un équilibre dissociation-recombinaison entre espèces neutres et des ions. Dans le cas le plus simple où les ions sont monovalents, cet équilibre peut être schématisé par la réaction:



K_d : constante de dissociation.

K_r : constante de recombinaison.

A l'équilibre thermodynamique, les concentrations des ions (positifs n^+ et négatifs n^-) et des espèces dissociables n_0 sont liées entre elles par la relation:

$$n^+ = n^- = \left(\frac{K_d}{K_r}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot n_0 \quad (2)$$

n^+ : concentration des ions positifs

n^- : concentration des ions négatifs

Sous l'influence du champ appliqué, le déplacement des ions

modifie l'équilibre initial. La dissociation des paires d'ions augmente du fait de l'abaissement de l'énergie de séparation des ions ΔW .

Pour un dipôle favorablement aligné, dans le champ électrique (angle formé par le dipôle et le champ appliqué=0) ΔW s'exprime par la relation:

$$\Delta W = \left(\frac{e^3 E}{\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

e : charge de l'électron.

E : champ électrique appliqué.

Le nombre d'ions libres est ainsi multiplié par un facteur proportionnel à:

$$\exp\left(\frac{\Delta W}{RT}\right) = \exp\left(\frac{e^3 E}{\pi \epsilon_0 \epsilon_r K^2 T^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Onsager a présenté une théorie cinétique complète de cet effet qui fut découvert par Wien en 1927. Son modèle est établi en considérant que les ions sont des billes soumises au mouvement Brownien qui se déplacent dans un milieu continu défini par sa viscosité η et sa constante diélectrique ϵ . Selon le modèle d'Onsager, la distribution entre les ions libres et les paires d'ions est régie par l'équilibre suivant:



La constante de vitesse de recombinaison K_r est indépendante du champ électrique, sa vitesse maximale vaudrait selon Langevin:

$$K_r = \frac{e(n_+ - n_-)}{e} \quad (6)$$

Par contre, selon Onsager, la constante de dissociation K_d est une fonction croissante de la valeur absolue du champ électrique E.

$$K_d = \frac{K_d(E-0) J_1 [(-8b)^{\frac{1}{2}}]}{(-2b)^{\frac{1}{2}}} - K_d(E-0) F(b) \quad (7)$$

où J_1 est la fonction de Bessel d'ordre 1

1.1.2 Création de charges à l'interface par des réactions électrochimiques: [2-3-4]

La mise en contact d'un métal et d'un isolant produit spontanément une redistribution des espèces chargées et des espèces neutres jusqu'à une certaine distance dans chacun des milieux d'où la création de deux couches.

La couche compacte:

Elle est constituée d'ions du liquide qui ont été attirés par la paroi solide ainsi que des espèces neutres possédant une affinité spécifique pour le solide. Son épaisseur est de l'ordre de deux fois la taille de la molécule. C'est à travers cette couche qu'a lieu le transfert électronique entre l'électrode et le porteur dans le liquide.

La couche diffuse:

Elle se situe au delà de la limite de la couche compacte, son épaisseur équivalente est donnée par la longueur de Debye L_d qui spécifie l'épaisseur de l'atmosphère ionique qui se forme autour d'un ion et dépend de la résistivité du milieu.

La Charge totale contenue dans les deux couches est compensée par une charge égale et opposée dans le solide [8]. Si on applique un champ électrique supérieur à celui qui règne, la couche diffuse sera détruite et les ions qui la constituent seront entraînés dans

le liquide, il y a injection de charges. Dans le cas des solvants non polaires ($\epsilon_r < 3$), supposons que les ions soient formés à l'interface à la distance "a" de l'électrode. Ils sont soumis à la force-image et l'énergie d'interaction entre un ion monovalent et le métal est:

$$W = \frac{e^2}{16\pi\epsilon_0\epsilon_r a} \quad (8)$$

1.1.3 Conduction en champ intense [3].

1.1.3.1 Introduction:

Les mécanismes de création de charges précédemment décrits: injection à l'interface par des processus électrochimiques ou dissociation volumique renforcée par le champ ne sont plus envisageables dans ce cas. D'autres processus possibles de génération de charges sont dans ce cas l'émission ou l'ionisation par effet de champ à l'interface métal/liquide et aussi l'ionisation en volume par les électrons.

Les premiers résultats obtenus par Denat [4] dans le cyclohexane ultra purifié confirment l'existence de tels mécanismes.

1.1.3.2 Emission et ionisation de champ:

Emission de champ:

En appliquant une tension négative à la pointe d'un système pointe-plan, il a été observé une augmentation rapide du champ qui s'atténue ensuite lorsque la tension excède une certaine valeur critique [3-4-6].

Ces auteurs attribuent cet accroissement à l'émission d'électrons par effet de champ.

Ionisation de champ:[2-3]

Ce mécanisme d'ionisation de champ à l'anode, observé dans l'Hydrogène et l'Argon liquide [7-8] est caractérisé par une augmentation rapide du courant.

En considérant que les molécules (ou atomes) sont sans interactions, l'expression du courant serait:

$$\ln(I) - \ln(b) - \frac{1.03 \cdot 10^8 (L_1 - \phi_1) \phi_1^{\frac{1}{2}}}{\beta V} \quad (9)$$

b: indépendant du champ.

L_1 (en ev): énergie d'ionisation des molécules en phase liquide.

ϕ_1 : travail de sortie du métal.

β (en cm^{-1}): Facteur reliant le champ sur la pointe à la tension appliquée.

1.1.4 Courant limité par charge d'espace:

Le champ régnant en tout point de l'espace est composé d'un champ harmonique appliqué et d'un champ dû à la charge d'espace; si la charge n'est pas importante, ce dernier est négligeable.

Pour des valeurs élevées du courant, la loi d'émission ou d'ionisation n'est plus vérifiée car, dans ce cas, le courant est limité par la charge d'espace et non par le mécanisme de sa formation. [2]

Dans l'approximation hyperboloïde-plan, Coelho et Debeau [9] ont déduit une expression du courant sur l'axe de la pointe en présence de la charge d'espace qui est donnée par l'expression suivante:

$$r = \left(\frac{\pi \epsilon K}{0.78 d} \right)^{\frac{1}{2}} V^2 \quad (10)$$

K: mobilité.

d: distance entre le centre de courbure de la pointe et le plan.

1.2: Génération d'une phase gazeuse:

Introduction:

Il a été observé que des bulles de gaz sont générées au voisinage d'une pointe; puis sont violemment chassée à une vitesse de quelques mètres par seconde vers le plan dans le cyclohexane sous tension continue [10].

Ceci a été confirmé par analyse spectroscopique de la lumière émise par le streamer et par analyse chromatographique des gaz dissous dans le liquide une fois qu'un certain nombre de streamers y soient développés [11]. Cependant, cette génération ne peut conduire forcément au claquage. [10-12-13].

Pour KAO (1961), la rigidité diélectrique des liquides tels que l'hexane, l'heptane, le benzène ... dépend de la pression hydrostatique. Mais, plus tard KAO et Mc MATH (1970) ont constaté que pour des impulsions de tension dont la durée est de l'ordre de la nanoseconde, le claquage de l'hexane n'est pas altéré par les variations de pression.

Dans la théorie que KAO a formulé, le claquage se produit dans des bulles qui se formeraient de plusieurs façons:

A partir de poches de gaz près des électrodes, par une répulsion électrostatique des charges d'espaces, qui dépasserait la tension superficielle; en raison d'une dissociation des molécules du liquide par des électrons, ou d'une vaporisation du liquide par le courant dû à des impuretés ou émis à partir d'aspérités sur les électrodes.

1.2.1.1 Modèle de WATSON et SHARBAUGH :

Watson et Sharbaugh considèrent qu'une bulle de vapeur est générée dans le liquide par injection de courant, à partir d'aspérités sur la cathode. [12]

L'énergie ΔH nécessaire à produire l'ébullition du liquide sous tension impulsionnelle U , de durée τ peut être reliée au champ E , en géométrie plane par :

$$\Delta H = A.E^n.\tau \quad (11)$$

où A est une constante

E : est supposée proportionnel à U .

τ : est le temps du séjour du liquide dans la région du champ fort, au voisinage d'une aspérité sur la cathode à partir de laquelle le courant est probablement limité par charge d'espace et qui serait de la forme :

$$I = A.U^n \quad (12)$$

avec:

$$1.5 \leq n \leq 2$$

Par ailleurs, la vaporisation d'une masse m du liquide nécessite une quantité de chaleur :

$$\Delta Q = m.(C_p.\Delta\theta + L_v) \quad (13)$$

où C_p : est la chaleur spécifique moyenne.

$\Delta\theta$: la différence entre les températures d'ébullition et initiale du liquide.

L_v : la chaleur latente de vaporisation.

En identifiant ces deux énergies, WATSON et SHARBAUGH ont établi un critère de claquage tenant compte de l'effet de la température, de la pression et des propriétés thermiques du liquide. Néanmoins, ils ont utilisé une équation relative à l'état stationnaire alors qu'il s'agit d'un régime transitoire d'échauffement.

Ce modèle n'est suivi que par un nombre limité de liquides [5].

1.2.1.2 Modèle de KAO :

KAO a proposé un modèle dont le critère est le même que celui de WATSON et SCHARBAUGH, mais considère qu'il ne s'applique qu'à un courant filamentaire issu de la cathode (limité par charge d'espace), qui provoque la vaporisation [14]. Si le courant est suffisant pour amener la température du liquide à son point d'ébullition, il aura lieu.

En plus de l'effet de la température, de la pression et des propriétés thermiques, il prend en considération la variation de la mobilité avec la température, de même qu'il considère le régime transitoire.

Ce modèle permet de prédire convenablement la dépendance de la rigidité avec la température, la pression et la structure du liquide [5].

Ainsi, il a été remarqué que si une décharge électrique peut se produire, elle peut donner lieu à une certaine vaporisation.

On pourrait donc s'attendre à trouver une corrélation entre, la rigidité et les propriétés thermiques du liquide.

Les observations faites par Denat et Al [15], dans le cyclohexane ultra-pur en géométrie pointe-plan sont en faveur de ce mécanisme.

1.1.1.3 Modèle de vaporisation : [1]

La cavité gazeuse est la conséquence d'un courant qui traverse le système dont l'effet joule vaporise localement le liquide.

La quantité d'énergie nécessaire pour vaporiser une môle du liquide est donnée par:

$$W_{eb} = L_v + \int_{T_{amb}}^{T_{eb}} C_p(T) dT \quad (14)$$

par ailleurs, la quantité d'énergie injectée dans le système est

donnée par:

$$W = Q.U \quad (15)$$

Q: charge électrique

U: tension électrique appliquée.

Donc le nombre de moles de vapeur générées suite à un dépôt d'énergie W est:

$$N = \frac{W}{W_{eb}} = \frac{pV}{Rt_{eb}} \quad (16)$$

P: Pression; R: constante du gaz parfait; T_{eb} : température d'ébullition; T_{amb} : température ambiante; V: volume de vapeur générée et défini par:

$$V = \frac{4}{3} \pi R_m^3 \quad (17)$$

R_m : le rayon moyen de la bulle (la bulle étant supposée sphérique).
Ce rayon est donnée par la relation suivante:

$$R_m = \left[\frac{3RT_{eb}}{4\pi \int_{T_{amb}} C_p(T) dT + L_v} \right]^{1/3} \left[\frac{W}{P} \right]^{1/3} \quad (18)$$

1.2.2 Mécanisme de cavitation :

Le mécanisme de cavitation concerne non seulement la formation d'une cavité gazeuse, mais aussi son expansion et sa disparition. Ce mécanisme peut avoir lieu aussi bien dans le volume du liquide que sur les parois. A ce propos, une théorie assez simple et fort séduisante sur le mécanisme de claquage dans les diélectriques liquides et en particulier dans le n-hexane et l'hexachlorobiphényl, a été proposée par KRASUCKI.

Théorie de KRASUCKI [16]:

L'auteur suggère qu'une perturbation sous forme de vacuole créée par vaporisation du liquide prend naissance lorsque se produit un point de pression nulle dans le liquide. Le facteur le plus probable parmi ceux pouvant provoquer la formation de tels points serait la présence de particules solides (impuretés) en suspension dans le liquide, ces particules pourraient être des particules métalliques, sphériques de rayon variant de 100 à 250 Å dues à l'usure du matériau de l'électrode durant la phase de conditionnement des électrodes; elles pourraient être également de petites tailles et subsisteraient après purification du liquide. Un bombardement électronique de l'interface vacuole primaire-liquide conduit à l'augmentation de la vaporisation et au grossissement de cette vacuole. Après formation, la bulle se déplace en s'éloignant de la zone où le champ est intense pour diminuer en volume et disparaître en se condensant dans les zones de champ faible lorsque la pression interne est nulle, ou grandit jusqu'à atteindre un certain rayon. De même l'auteur considère que le temps de claquage est proportionnel à la viscosité et donne l'expression:

$$\frac{t}{\eta} = 4 \int_{R_i}^{R_d} \frac{dR}{R [P(R) - (2 \frac{f_s}{R} - p_0)]} \quad (19)$$

où: P(R) est la pression instantanée dans la bulle.

f_s : la tension superficielle du liquide.

R : le rayon de la bulle supposée sphérique.

p_0 : la pression hydrostatique dans le liquide.

R_i : le rayon de la bulle à $t=0$.

En supposant la présence d'une particule conductrice de rayon r à l'interface électrode-liquide, il donne l'expression du champ maximum E' régnant à la surface de la particule.

$$E_m = 4.2E \quad (20)$$

où E est l'expression du champ uniforme en l'absence de la particule.

Ainsi, le champ électrique à l'interface liquide-particule exerce une pression P_e tendant à repousser le liquide de la surface de la particule; P_e étant donnée par la relation:

$$P_e = \frac{2\epsilon E^2}{\pi} \quad (21)$$

où ϵ est la permittivité du liquide.

Lorsque cette pression devient égale à la somme de la pression hydrostatique P_0 et la pression due à la tension superficielle, la pression sur la surface de la particule devient nulle et la condition de développement du point de pression nulle à la surface de la particule est donnée par:

$$E = 358 \left[\left(\frac{1}{\epsilon} \right) \left(P_0 + \frac{2f_s}{R} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad [V/cm] \quad (22)$$

lorsque cette équation est satisfaite, la bulle grossit jusqu'à atteindre son rayon critique R_f et mener au claquage.

Par ailleurs, Thomas[17] a aussi proposé un critère de pression nulle; en plus des paramètres considérés par Krasucki, il fait intervenir dans le calcul de la rigidité, le champ sur la cathode et le rayon des aspérités sur celle-ci.

Selon Thomas, la pression d'électrostriction s'oppose au décollement du liquide.

Les deux auteurs supposent dans leurs théories, que la cavité se forme par décollement du liquide. Cependant, ils n'apportent pas d'éléments décisifs pour la compréhension du mécanisme de génération de la bulle.

Modèle de Cavitation:

le critère de formation de cavités gazeuses dans un liquide à satisfaire est:

$$P_{em} = P_s + P_h \quad (23)$$

P_{em} : pression électromécanique.

P_s : pression superficielle.

P_h : pression hydrostatique.

$$P_{em} = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \quad (24)$$

ϵ : permittivité diélectrique du milieu.

E : champ électrique.

$$P_h = \rho gh \quad (25)$$

ρ : masse volumique.

g : accélération de la pesanteur.

h : hauteur entre la surface du liquide et l'électrode pointe.

la pression superficielle P_s est égale à la pression atmosphérique.

En combinant les expressions précédentes on obtient:

$$E \geq \left[2 \frac{(\rho gh + P_s)}{\epsilon} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

En assimilant, le système pointe-plan, à deux sphères concentriques où le champ est égal à:

$$E = \frac{U(r_p + d)}{r_p d} \quad (27)$$

U : tension électrique.

r_p : rayon de courbure de l'électrode pointe.

d : distance inter-électrodes

on obtient:

$$U \geq \left[2 \frac{(\rho gh + p_s)}{e} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{r_p d}{r_p + d} \right] \quad (28)$$

c'est la tension à partir de laquelle il y a cavitation.

1.3 Influence des paramètres sur la tension de génération:

1.3.1 Influence de la polarité de la tension et de la géométrie des électrodes [12]:

Dans le cyclohexane, pour un système pointe-plan, la tension de génération en polarité positive et négative, est la même et serait proportionnelle au rayon de courbure de la pointe. Pour un rayon de courbure donné et des distances inter-électrodes allant de 0.5 à 6mm, la tension reste inchangée [12].

1.3.2 Influence de la nature du liquide:

Il a été observé que les temps de génération en fonction du créneau de tension dans le PXE et le MDBT ainsi que dans les polybutènes, étaient de même ordre de grandeur que dans le cyclohexanes.[12]

Les tensions de génération de la bulle dépendent de la structure du liquide. Les tensions sont plus élevées dans le n-hexane et le cyclohexane que dans le tétrachlorure de carbone.[18]

1.4.Détermination du temps de génération:

1.4.1.Méthode de Von loue:

Cette méthode proposée pour les gaz et ensuite étendue aux liquides, consiste à considérer le nombre d'essais n_t où aucun claquage ne survient avant le temps t , sur une série de n essais. si t_p (temps de propagation) et t_q ne sont pas négligeables, on

obtient:

$$\frac{n_t}{n} = \exp \frac{-(t-t_p)}{t_g} \quad (29)$$

Dans le cas où la caractéristique $\ln(n_t/n)$ en fonction de t est une droite, on peut en déduire t_p et t_g . [5-12]

Il a été observé que t_g est beaucoup plus faible en polarité positive qu'en polarité négative dans l'huile silicone dans les mêmes conditions. t_g est sensiblement le même que dans les gaz (t_g proportionnels à $\exp(1/E_{100V})$) ce qui suggère l'intervention de processus électroniques dans la phase de génération.

1.4.2. Méthode de variation de r_p :

RZAD et Al [19] ont montré que sous tension rectangulaire, il est possible de séparer le phénomène de génération de celui de propagation en faisant varier le rayon de courbure de la pointe. Dans le cas des tensions élevées, t_p est pratiquement indépendant de r_p et t_g négligeable.

pour les tensions faibles, la tension et le temps de génération dépendent de la géométrie des électrodes et de la forme de la tension; t_g est d'autant plus grand que la tension appliquée et le rayon de courbure de r_p sont faibles.

En extrapolant aux temps longs, la courbe correspondant à la seule propagation ($t_g \approx 0$), on obtient une estimation du temps de propagation t_p ; d'où l'on déduit t_g ($t_g = t_r - t_p$)

t_r : temps de retard au claquage.

Cependant, il est difficile d'établir une loi de variation de t_g , vu l'imprécision de la méthode.

1.4.3 Méthode de variation du temps de montée de la tension : [5-12-20]

Pour une tension en créneau, cette méthode consiste à faire varier le temps de montée t_a pour une tension donnée U et à déterminer le temps t_{ap} nécessaire à l'apparition d'une perturbation au voisinage de l'électrode acérée.

Dans le cyclohexane en pointe négative, pour une tension de génération U_g donnée, les caractéristiques $t_{ap}=f(t_m)$ sont quasi-linéaires; ce qui a permis d'établir la relation suivante:

$$t_{ap} = t_g + A(V) \cdot t_m \quad (30)$$

$A(v)$:pente de la caractéristique $t_{ap}=f(t_m)$.

Lorsque $t_m \rightarrow 0$; $t_{ap} \rightarrow t_g$, par conséquent du tracé des courbes $t_{ap}=f(U)$ déduites de $t_{ap}=f(t_m)$; pour différents valeurs de U , on peut obtenir par extrapolation (à $t_m=0$), les variations de t_g en fonction de U . Ils trouvent que t_g décroît de manière linéaire et très rapidement lorsque la tension augmente.

2. PROPAGATION DES STREAMERS:

2.1 Etude des streamers:

2.1.1 Forme des streamers:

Il ressort des travaux récents que dans un système d'électrodes pointe-plan, les streamers rapides ($v \geq 2\text{km/s}$) sont filamenteux alors que les streamers lents ($v \approx 100\text{ m/s}$) présentent plutôt une forme rappelant celle d'un buisson [1].

En général il a été observé que, dans un système pointe-plan, les streamers lents apparaissent en polarité négative et les streamers rapides en polarité positive.

Néanmoins, Mc KENNY et Mc GRATH [2] ont observé les deux modes dans le n-hexane en pointe négative, YAMASHITA et AL [3], dans l'huile de transformateur, en pointe positive.

BEROUAL, [4] a constaté, dans le cyclohexane, pour les deux polarités, qu'à partir d'un streamer subsonique qui n'a traversé que partiellement l'intervalle inter électrodes, il peut se développer un second streamer très fin de vitesse beaucoup plus élevé et que la probabilité d'apparition des streamers lents dépend de la tension, de l'intervalle inter électrodes et de la pression.

La probabilité d'apparition d'un mode supersonique croît avec la tension ou/et la pression ou /et l'intervalle inter-électrodes [24].

la température semble favoriser l'apparition des streamers subsoniques.

2.1.2 Vitesse des streamers:

Une relation étroite lie la vitesse et la forme du steamer: les streamers rapides sont filamenteux et ceux qui sont lents ont la forme d'un buisson. Si la vitesse d'un streamer négatif, dans un liquide, est comparable à celle d'un streamer positif, dans un autre liquide, les deux formes sont analogues [5-12-20-24].

Il semble que la vitesse du streamer dépend de la nature du liquide et non uniquement de la polarité de la pointe.[12-20-24-25].

2.1.3 Distribution des vitesses des streamers:

CHADBAND et WRIGHT [12] sont les premiers à constater qu'entre pointe négative et le p⁺ dans le cas de n-hexane, la distribution de la vitesse admettait un minimum plus ou moins marqué (environ à mi-distance inter-électrodes).

D'autres observations ont montré, que pour le n-hexane et quelle que soit la polarité de la pointe, ce minimum est d'autant plus marqué que la tension appliquée est grande, ou que la vitesse moyenne du streamer est élevée.

Ce minimum est atteint entre le milieu et les deux tiers de l'espace inter-électrodes. Néanmoins, cette distribution fait exception dans certains cas.

Ainsi, DEVINS, RZAD et SCHWABE [26] ont observé que la vitesse demeure sensiblement constante le long de l'intervalle inter-électrodes.

Elle dépend peu de la tension appliquée et de la distance inter-électrodes dans l'huile de transformateur contenant 20 à 30% d'hydrocarbures aromatiques et dans le marcol 70 contenant une grande concentration de D.M.A (diméthyl-aniline), et ce quelle que soit la polarité de la pointe.

De même, dans le n-hexane en régime supersonique, la distribution de la vitesse est croissante sans présenter de minimum [26].

ALLAN et HIZZAL [27] ont remarqué que, quelle que soit la polarité le streamer se développe à une vitesse constante excepté aux niveaux des électrodes où le champs est renforcé.

LESAINTE et AL [25] confirmèrent ce résultat : la vitesse des streamers rapides est en moyenne constante entre les électrodes; par contre les streamers lents sont caractérisés par une grande dispersion.

Certains auteurs [5-12] ont observé que le streamer, en polarité positive ou négative, peut prendre naissance sous forme de

buisson et se propage ainsi jusqu'à environ le quart de la distance inter-électrodes, pour augmenter en vitesse et se propager jusqu'au plan en prenant une forme filamentaire.

Afin de donner une interprétation à ces distributions observées deux types de modèles ont été proposés:

- Le premier proposé par CHADBAND et WRIGHT considèrent que le streamer est assimilable à une sphère conductrice tangente à la pointe [28] dont la vitesse du streamer se propageant de la pointe vers le plan serait similaire à la variation du champ sur la sphère grandissant dans le temps entre les électrodes.
- Le deuxième type proposé aussi par CHADBAND [29] assimile le streamer à une extension de la pointe se déplaçant vers le plan. Ce type, contrairement au modèle de la sphère, n'a jusqu'à présent reçu que peu de confirmations expérimentales.

2.1.4 Forme des streamers et émission lumineuse:

Les courants et émissions lumineuses sont parfaitement corrélés à la forme et à la vitesse des streamers [5-12-20].

Le courant qui apparaît lors de la propagation, comporte des pics plus ou moins nombreux et intenses.

L'analyse spectroscopique de la lumière émise, montre que le spectre s'étend de l'ultra violet au visible [5], ceci révèle dans les hydrocarbures, la présence d'hydrogène atomique et moléculaire, de carbone, de métal provenant des électrodes et de chlorure dans tétrachlorure de carbone (CCL4).

L'amplitude et la forme des courants de streamers dépend de l'intervalle inter-électrodes, de la polarité de la pointe et de la tension appliquée aux électrodes.

Pour les distances relativement faibles ($\leq 1.5\text{cm}$), les streamers négatifs lents sont caractérisés par des courants formés de plusieurs pics discrets, très brefs ($\leq 10\text{ns}$), dont l'amplitude augmente et l'espacement diminue en général lorsque le streamer se propage. Ces courants sont plus intenses dans les liquides où les vitesses sont élevées.

-Les courants positifs croissent régulièrement jusqu'à l'électrode opposée (celle-ci étant bloquée par un isolant) pour marquer un maximum et décroître ensuite [5]. Ces courants sont caractérisés par une composante continue dont le maximum correspond à l'arrivée du streamer sur l'électrode opposée et le temps correspondant à ce maximum permet d'obtenir la vitesse moyenne du streamer [30].

Pour les grandes distances (>5cm), il a été observé [5] dans les deux polarités, que les courants sont constitués de pics discrets pouvant atteindre quelques ampères à des distances de 1m en "rod-plan".

2.1.5 Charge des streamers:

HEIMAN et AL [31] ont constaté que la variation de la charge moyenne en fonction du temps, en polarité positive, ne dépend pas du niveau de la tension appliquée: elle croit rapidement et se sature au bout d'une dizaine de nano-secondes.

Les résultats obtenus ultérieurement par d'autres auteurs ont mis en évidence le fait qu'en pointe négative, la charge augmentait par paliers, où chaque variation Q_i est engendrée par un pic de courant [5-7-12-21-32].

D'après Bérroual [21] cette variation par paliers correspond à l'évolution d'un streamer lent et qu'elle peut être également observé en pointe positive.

Le temps entre chaque saut tend à diminuer avec la vitesse.

Pour les streamers très rapides (quelques Km/s), la variation devient pratiquement continue. D'une manière générale, la charge des streamers rapides est beaucoup plus importante que celle des streamers lents quelle que soit la polarité; un streamer négatif rapide peut avoir une charge dont l'amplitude et la forme sont similaires à celles d'un streamer positif.

La variation de la charge théorique en fonction du temps correspondant au modèle de la sphère conductrice en expansion vers le plan décrit bien celle des streamers rapides [5-12].

2.2 Influence des paramètres:

2.2.1 Influence de la tension:

-Le temps de montée de la tension, sa polarité, sa durée et son amplitude affectent énormément la vitesse de propagation et la forme des σ [35].

-Quelle que soit la polarité de la pointe, la vitesse croit fortement et le streamer devient filamentaire avec l'augmentation de l'amplitude de la tension.

La tension de claquage en pointe positive est généralement inférieure à celle en pointe négative [36], ce qui explique le fait que la polarité positive a été la plus étudiée.

-Pour des niveaux de tension légèrement supérieurs à la tension de seuil d'apparition du streamer, plusieurs auteurs ont observé l'apparition d'une bulle gazeuse à la pointe qui se déplace en diminuant de volume vers le plan [12-13].

-La durée d'application de la tension influe sur l'aboutissement ou non du streamer au claquage. En effet, si l'on coupe la tension avant que le streamer n'atteigne l'électrode opposée, il arrête de se propager et se pulvérise [12].

2.2.2 Influence de la distance inter-électrodes:

Plusieurs observations faites pour les distances inter-électrodes inférieures à 6mm, confirment le fait que quel que soient le liquide et la polarité de la pointe, la vitesse du streamer est d'autant plus grande que l'intervalle inter-électrodes est réduit, pour une tension et un rayon de courbure donnés [12].

-Pour une tension donnée les courbes des courants en fonction de la distance inter-électrodes ont une allure décroissante quelle que soit la polarité [1].

-Le courant dans le tétrachlorure de carbone n'est pas affecté par la distance inter-électrodes pour les niveaux de tension appliqués [1] ceci serait dû à la structure chimique du liquide qui est apolaire et non dissociable.

-La charge injectée augmente lorsque la tension croît pour les deux polarités ou/et la distance inter-électrodes diminue [1].

2.2.3 Influence du rayon de courbure de la pointe:

Le rayon de courbure de la pointe joue un rôle important sur la nature et la durée des phénomènes prédisruptifs.

-Plus le rayon de courbure de la pointe est faible, plus le champ électrique obtenu est intense. SIBILOT et COELHO [37] ont pu obtenir des champs électriques excédant largement les 100MV/cm au sommet d'une pointe métallique très fine de rayon de courbure inférieure à 100 Å immergé dans un liquide cryogénique (LN2 azote liquide) soigneusement purifié, sans apparition de moindres phénomènes disruptifs ni de conduction mesurable.

-Pour des rayons de courbures ($3\mu\text{m} \leq r_p \leq 40\mu\text{m}$), la variation de la vitesse du streamer est peu importante alors que le champ de seuil de génération (calculé avec l'approximation hyperboloïde) est très altéré: $E_s \propto 1/r_p^{0.5 \text{ à } 0.7}$ [12-18].

2.2.4 Influence du métal de l'électrode:

La nature de l'état des électrodes n'a pas d'influence notable sur les phénomènes de propagation alors qu'ils interviennent dans la phase de génération.

2.2.5 Influence de la structure du liquide:

Le tableau 1 donne une idée concernant l'influence de la structure du liquide sur la vitesse de propagation des streamers.

Liquides	Vitesse des streamers (km/s)	
	V_+	V_-
n-heptane	3.4	0.22
n-pentane	3.6	0.11
n-hexane	3.2	0.19
n-octane	3.3	0.13
cyclohexane	2.8	0.056
benzène	1.2	0.12
toluène	1.2	0.60
dodécylbenzène	2.3	0.081
huile de transformateur	2.2	1.1
tétrachlorure de carbone	30	8.4
monochlorobenzène	76	0.45
trichlorobenzène	62	25
iodobenzène	15	9.1

Tableau 1: Vitesse moyenne des streamers entre la pointe et le plan [38]

$U = 42.8 \text{ kV}$, $d = 4 \text{ mm}$, $r_p = 10$

Les vitesses les plus élevées sont obtenues dans les liquides

contenant des halogènes où les streamers positifs et négatifs se propagent tous deux rapidement.

Il suffit que la molécule renferme un atome de chlore (chlorocyclohexane) [5-29] pour que la vitesse des streamers négatifs soit multipliée par 10 par rapport au cyclohexane. Ceci montre que les propriétés d'attachement ou de détachement d'électrons par les molécules du liquide ainsi que l'énergie de dissociation W_{ion} , sont déterminantes pour fixer la vitesse de propagation des streamers [5-12].

2.2.6 Influence des additifs non ioniques:

2.2.6.1 Additifs capteurs d'électrons:

L'action des additifs sur les diélectriques liquides est assez remarquable et est d'une portée considérable pour les applications. Il a été observé [5-12-29-30-34] que l'addition de composés capteurs d'électrons rend les streamers négatifs plus filamentaires et augmentent considérablement leur vitesse (jusqu'à cinq fois leur vitesse initiale) pour une concentration de 0.05mole/litre d'hexafluorure de soufre (SF_6 , possédant un potentiel d'ionisation élevé: $V_i=15.9\text{ev}$) ou de chlorure d'éthylène (C_2H_5CL avec: $V_i=10.97\text{ev}$) dans une huile naphénique et dans le 2-2-4 triméthypentane; alors qu'aucun effet n'est décèlé sur les streamers positifs dans ces liquides.

De même que l'addition de 0.04moles/litres de CCL_4 dans l'hexane ou le cyclohexane multiplie par 10 la vitesses des streamers négatifs tout en rendant aussi leur forme filamentaire [34].

Au delà de 0.04 mole/litre, l'accroissement de la vitesse devient peu important [12].

2.2.6.2 Additifs à bas potentiel d'ionisation:

L'addition de composés à bas potentiel d'ionisation tel que: La N,N,diméthylaniline (D.M.A: $V_i= 6.7\text{ev}$) n'agit presque pas sur la vitesse des streamers négatifs mais provoque une augmentation

(2 à 3 fois) celle des streamers positifs en les rendant plus filamenteuses encore dans une huile naphténique, dans le 2-2-4 triméthylpentane et le cyclohexane [12-30-34].

L'effet de ces additifs croît avec la concentration de ceux-ci jusqu'à une valeur (0.05 à 0.06 mole/litre environ) au delà de laquelle on observe une saturation où du moins un effet non important [5-12].

2.2.7 Influence des additifs ioniques:

Les additifs ioniques les plus étudiés sont le T.I.A.P (triisooammonium picrate) et l'A.O.T (Aérosol O.T). L'addition du premier au cyclohexane est en faveur d'une conduction dans laquelle prédomine très largement le phénomène d'injection de porteurs par l'électrode alors que l'A.O.T confère au cyclohexane une conduction par création d'ions en volume [12].

L'action de ces additifs sur la vitesse des streamers fait intervenir les propriétés électroniques de ceux-ci; alors que leur conductivité ne joue aucun rôle. [39-40]

A cet effet, A.Béroual [12] a rapporté deux résultats explicatifs:

-La vitesse reste inchangée avec l'A.O.T alors qu'elle double en présence de T.I.A.P et ce, pour une même concentration de ces additifs (10^{-3} mole/litre) quoique la conductivité de la solution de l'A.O.T ($\sigma=10^{-10}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$) est de 2000 fois plus grande que celle obtenue avec le T.I.A.P ($\rho=5 \cdot 10^{-14}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$). Ceci suggère que le T.I.A.P agit par ces propriétés électroniques sur la vitesse du streamer.

- En pointe négative, la vitesse du streamer est multipliée par 10 avec une augmentation de la concentration d'A.O.T à 10^{-1} mole/litre; ce qui renforce l'idée de l'action de l'A.O.T par ses propriétés électroniques.

Ces résultats sont en bonne concordance avec ceux obtenus par certains auteurs [5-40], sans qu'on puisse pour autant donner une explication théorique.

2.3 Modèles d'évaluation des vitesses:

2.3.1 Modèles de Watson:

Watson à proposé deux modèles, basés sur l'aspect énergétique du streamer.

1er Modèle:

Watson assimile le streamer apparaissant sur une pointe négative à une cavité de faible densité, sensiblement sphérique et conductrice.

En égalant le travail de la pression électrostatique (nécessaire à l'expansion de la sphère) à l'énergie cinétique du liquide, on obtient pour vitesse:

$$v = E(R) \cdot \left(\frac{\epsilon}{3\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (31)$$

où ρ est: la masse volumique du liquide.

ϵ : la permittivité diélectrique du liquide.

et $E(R)$: le champ électrostatique sur le front de la sphère conductrice.

$$E(R) = E_a \cdot \frac{[2 - (\frac{R}{2L})]}{(\frac{R}{2L}) \cdot [1 - (\frac{R}{2L})]} \quad (32)$$

avec $E_a = U/L$

Néanmoins, au lieu d'utiliser l'expression du champ sphérique, il considère le champ crée par un hyperboloïde dont le champ est approximé par:

$$E(R) = \left[\frac{U}{R\sqrt{2}}\right] \quad (33)$$

d'où il obtient:

$$v = \left(\frac{U}{R}\right) \cdot \left(\frac{\epsilon}{6\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (34)$$

et donne une valeur approximative du rayon R de la cavité évoluant dans le temps:

$$R = \left[\frac{2\epsilon}{3\rho} \cdot \frac{1}{2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (35)$$

Dans une autre approximation, Watson prend pour valeur du champ celle calculée pour un hyperboloïde.

$$E(R) = \left(\frac{U}{R}\right) \cdot \left(\frac{R}{a}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (36)$$

et donne :

$$R = \left[\left(\frac{7}{4}\right) \cdot U \cdot t \cdot \left(\frac{2\epsilon}{3\rho} a^{\frac{1}{2}}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^{0.571} \quad (37)$$

L'analyse de la fonction $V(t)$, montre que cette expression ne présente pas de minimum dans l'intervalle inter-électrodes.

De même qu'on remarque que ce modèle ne fait intervenir que deux propriétés physiques du liquides: la masse volumique ρ et la permittivité diélectrique. comme ces deux dernières varient peu d'un liquide à l'autre, la vitesse serait pratiquement la même dans tous les liquides. Ce qui n'est pas le cas.

2eme Modèle:

Dans une autre approche, Watson considère le streamer comme étant la surface de séparation entre un volume de fluide conducteur (gaz ionisé ou plasma) émis par une source hypothétique (la pointe) et le reste du liquide.

En égalant la force exercée par le fluide due à la vitesse du streamer à la force électrostatique qui agit à son extrémité; et en supposant que le fluide s'écoule selon un filament cylindrique de

rayon R_s dont le sommet est sphérique il obtient:

$$v = \left(\frac{U}{R_s}\right) \cdot \left(\frac{3\rho}{8e}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

De la même façon qu'au premier modèle, Watson ne tient compte que de quelques propriétés du liquide et ne prévoit pas de minimum dans la distribution de vitesses.

Les vitesses obtenus à partir de ce modèle sont relativement faibles ($V \leq 1 \text{ km/s}$); alors qu'on assimile le streamer à un filament (streamer rapide), il devrait trouver des vitesses nettement supérieures, chose qui a été observé expérimentalement par plusieurs auteurs [12-20-26].

2.3.2 Modèle de Krasucki:

Krasucki [16] considère le streamer comme une perturbation sensiblement sphérique prenant naissance sur une électrode et qui grossit pour atteindre une taille critique et mener au claquage. Contrairement à Watson qui suppose que le streamer est une cavité conductrice, Krasucki considère lui que la cavité est une bulle de vapeur dont il calcule la variation du rayon R en fonction du temps.

$$R = \left[\left(2 \frac{f_s}{P_0} + R_i \right) \exp\left(-t \cdot \frac{P_0}{4\eta}\right) - 2 \frac{f_s}{P_0} \right] \quad (39)$$

où:

P_0 : Pression hydrostatique dans le liquide.

R_i : rayon de la bulle à $t=0$.

η : viscosité du liquide.

f_s : tension superficielle du liquide [dyn./cm].

Néanmoins, ce modèle est assez particulier car il a été formulé après une étude sur les fluides où les termes de viscosité sont négligeables.

2.3.3 Modèle de felici:[42]

Felici schématise le streamer par un canal cylindrique très allongé, conducteur, de section S et de longueur l , dont l'extrémité vive avance dans le diélectrique vierge avec la vitesse V .

Par l'autre extrémité, il est en relation avec une source de tension constante U fournissant un courant i pendant la progression du canal, qui présente une certaine résistance électrique R_e . Un champ électrique d'intensité moyenne quadratique E règne autour de l'extrémité vive.

En considérant un canal relativement bon conducteur, la condition de propagation serait donc:

$$Re.i_e \ll U \quad (40)$$

De même qu'il suppose que le canal doit être électriquement neutre, sauf dans les régions de très faible étendue.

L'électrostatique des conducteurs montre que le travail des forces appliquées à l'extrémité vive est dans l'unité de temps:

$$W_e = \frac{1}{2} (\epsilon E^2 S V) \quad (41)$$

où ce travail peut être dépenser pour ioniser, le milieu, l'échauffer, le vaporiser et le déplacer. En égalant ce travail à l'accroissement de l'énergie du système à potentiels constants:

$$W'_e = U.i \quad (42)$$

il obtient:

$$i = \left(\frac{1}{2} \epsilon E^2\right) S \frac{V}{U} \quad (43)$$

d'où l'expression de la condition nécessaire à la propagation:

$$\frac{e \cdot E^2 \cdot l \cdot v}{K \cdot q \cdot U^2} \ll 1 \quad (44)$$

où K et q désignent respectivement: la mobilité des électrons et leurs densités de charge.

En considérant que le canal contient une phase gazeuse ionisée et que le travail des forces électriques est dépensé à créer cette phase au liquide, à l'ioniser, puis à repousser le liquide au fur et à mesure que le canal avance, il donne l'expression d'équilibre énergétique suivante, en supposant que la phase gazeuse est la vapeur du liquide:

$$e \frac{E^2}{2} - q \cdot V_i + \rho \frac{U^2}{2} + L' \quad (45)$$

qV_i : est l'énergie d'ionisation par unité de temps.

$\rho U^2/2$: le travail de déplacement par unité de temps.

L' : l'énergie totale de vaporisation et de décomposition.

D'où la condition $R_e \ll U$ s'écrit sous la forme:

$$\left[\frac{2V_i l \left(\frac{e}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot E}{KV^2} \right] \frac{Y}{1 - Y^2 - \frac{2L'}{eE^2}} \ll 1 \quad (46)$$

$$\text{avec: } Y = \left(\frac{\rho}{e}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{V}{E}$$

Cette expression a permis à Felici d'estimer la vitesse du canal contenant une phase gazeuse qui saurait dépasser de beaucoup le Km/s, ce qui est en conformité avec les mesures expérimentales.

Néanmoins, le fait d'assimiler un streamer lent à un seul canal serait en contradiction avec les observations expérimentales.

2.3.4 Modèle de Devins, Rząd et Schwabe [28]

a: Streamer positif:

Ces auteurs ont été les premiers à introduire les paramètres physico-chimiques du liquide dans l'expression de la vitesse de propagation du streamer. Ils considèrent que les porteurs de

charges sont produits par effet Zener, comme dans les solides où les électrons passent par effet tunnel de la bande de valence à la bande de conduction sous l'action du champ.

Le streamer est assimilé à un filament cylindrique conducteur, de rayon r_0 , contenant une concentration c de porteurs positifs et négatifs et donc l'extrémité vive est sphérique. Ainsi, le nombre de porteurs Z produits par unité de temps serait:

$$Z = \pi r_0^2 C v \quad (47)$$

où v : est la vitesse de propagation du streamer.

Z est donné par le modèle de Zener sous l'expression:

$$Z = \int_{r_0}^{\infty} 2\pi r^2 n \gamma dr \quad (48)$$

où n : est le nombre de molécules par cm^3 .

γ : est le coefficient d'ionisation donné par Zener:

$$\gamma = \frac{e E a}{h} \exp\left(-\frac{\pi^2 m a V_i^2}{h^2 e E}\right) \quad (49)$$

avec E : l'intensité du champ électrique.

e : la charge de l'électron.

h : la constante de Planck.

a : la distance inter-moléculaire.

m : la masse de l'électron.

V_i : le potentiel d'ionisation de la phase liquide.

En supposant une distribution de champ sphérique:

$$E(R) = \frac{E_0 r_0^2}{r^2} \quad \text{ou} \quad E_0 = \frac{U}{r_0} \quad (50)$$

et en combinant les équations (I47), (I48), (I49) Devins et Al obtiennent:

$$v = \left[\frac{(ae^3 E_0^3)}{(\pi m V_i^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{n}{c} r_0 e_{ifc} \left[\frac{\pi^2 m a V_i^2}{h^2 e E_0} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (51)$$

E_0 et U sont le champ et le potentiel à la tête vive du streamer.

Ce modèle a permis à Devins et Al de justifier la dépendance de la vitesse, du potentiel d'ionisation V_i et de la densité (par l'intermédiaire de n et a) tel qu'ils l'ont observé expérimentalement.

Malgré les résultats convenables donnés par ce modèle; il a été largement discuté [12] et reste encore limité car il ne concerne qu'un seul filament de rayon constant.

b: Streamers négatifs:

Devins et Al considèrent que les streamers négatifs apparaissent et se développent suivant deux étapes:

La première consiste en l'injection d'électrons qui seront piégés.

La seconde consiste en l'injection du liquide. La vitesse serait ainsi déterminée en polarité négative par le temps que dure l'une ou l'autre étape.

-Si le temps de piégeage est réduit par addition de composés capteurs d'électrons, la durée de la première étape et donc de l'injection serait diminuée, la vitesse accroîtrait alors.

-Si le temps d'ionisation est réduit par addition de composés capteurs d'électrons, la durée de la deuxième étape (l'ionisation) serait réduite, ce qui accroîtrait aussi la vitesse.

De la même manière qu'en polarité positive, Devins et Al assimilent le streamer à un plasma conducteur se propageant de la pointe vers le plan.

2.3.5 Modèle de Béréal et Tobazéon [12-34]:

A. Béréal et R. Tobazéon considèrent que le streamer est constitué d'une phase gazeuse pouvant être produite soit par vaporisation du liquide soit par dissociation des molécules du

liquide.

Ceci a été justifié par l'énorme influence de la pression hydrostatique sur l'apparition du streamer et par les analyses de chromatographie et de spectroscopie d'émission.

Les mécanismes pouvant intervenir dans la propagation et la génération sont: la vaporisation, la décomposition chimique, l'énergie capillaire (liée à l'interface gaz-liquide), le déplacement et ionisation.

La possibilité pour l'un ou l'autre de ces mécanismes d'intervenir dépend de l'énergie électrique totale W_t dont dispose le système.

La fraction d'énergie W_c disponible pour le déplacement du système serait:

$$W_c = \beta W_t \quad (52)$$

où $0 < \beta < 1$

En assimilant le streamer à un ensemble de n branches cylindriques, ils écrivent à tout instant:

$$\sum_{j=1}^n \frac{1}{2} (\rho \pi r_j^2 \cdot dl_j) v_j^2 - \beta \sum_{j=1}^n q_j E_j dl_j \quad (53)$$

où : r_j , dl_j , v_j , q_j et E_j sont respectivement: le rayon de la branche, son déplacement, sa vitesse, sa charge et le champ à son extrémité vive.

ρ : étant la masse volumique de la phase gazeuse.

En considérant que toutes les branches sont de même rayon ($r_j = r$) et qu'elles se déplacent à la même vitesse ($v_j = v$), ils obtiennent une expression de la propagation dans le temps:

$$v^2 = \left(\frac{2}{\rho \pi r^2} \right) \left(\frac{\beta}{n} \right) \sum_{j=1}^n E_j \cdot \int_0^t I_j \cdot dt \quad (54)$$

où I_j est le courant du streamer à tout instant t.

Ce modèle leur a permis de confirmer le fait expérimental, que le streamer est d'autant plus rapide que:

Le nombre de branches décroît,
ou/et le rayon des branches décroît,
ou/et sa charge augmente,
ou/et le champ à la tête vive de chaque branche augmente,
ou/et l'énergie disponible au déplacement augmente.

Dans le cas des streamers lents dont les courants sont constitués de pics distincts, le courant devient non détectable et donc la vitesse selon l'expression précédente serait négligeable; ce qui indique que la propagation s'effectue de façon discontinue, c'est à dire par sauts. Plus la fréquence des pics de courants est importante, plus la durée des paliers est courte; la propagation du streamer tend à devenir continue et la vitesse augmente; ce qui est le cas en présence d'additifs capteurs d'électrons [12-34] où lorsqu'on augmente la tension. Les vitesses ainsi obtenues sont celles des streamers rapides. Plus la vitesse est importante, plus les paliers disparaissent et la propagation devient continue. Pour les streamers lents, la charge varie par sauts. Chaque charge élémentaire contribue au déplacement partiel du streamer. A chaque fois qu'il y aura une décharge, il y aura émission de lumière et le champ s'annulera, d'où déplacement par sauts.

Le champ électrique, à la tête vive d'une branche entre deux décharges consécutives, prend des valeurs suffisantes ($>50\text{MV/cm}$ d'après les résultats expérimentaux et théoriques [12]), pour déplacer le streamer. Les vitesses, ainsi obtenues, sont pour les hydrocarbures liquides simples, de l'ordre du km/s . Cependant cette vitesse deviendra nulle lorsqu'il y aura décharge ($E = 0$).

Il n'y aura déplacement qu'entre deux décharges consécutives. La vitesse moyenne de propagation des streamers, pour tout l'intervalle inter-électrodes sera donc beaucoup plus faible.

Elle dépendra du nombre de branches et des décharges élémentaires, par conséquent, le modèle décrit parfaitement le mode de propagation: continu ou par sauts.

2.3.5.2 Modèle d'expansion de la bulle:

Partant de l'hypothèse que la perturbation est une bulle conductrice se développant de la pointe vers le plan tout en restant sphérique durant son expansion, le travail effectué par toutes les forces agissant sur l'interface bulle-liquide est égal à :

$$W = \int_{R_0}^R 4\pi R^2 (P_e + P_h + P_s - P_i) dR \quad (55)$$

où P_e est la pression électrostatique, P_h la pression hydrostatique, P_s la pression due à la tension superficielle et P_i la pression à l'intérieur de la bulle; R_0 est le rayon initial et R à l'instant t .

En pratique, pour des tensions élevées, les pressions P_h , P_s et P_i sont négligeables par rapport à P_e . Dans ces conditions l'expression ci-dessus devient:

$$W = \int_{R_0}^R 4\pi R^2 P_e dR \quad (56)$$

Ce travail doit être égal à l'énergie cinétique E_c du liquide :

$$E_c = 2\pi R^2 \rho \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 \quad (57)$$

avec ρ la densité du liquide, ce qui nous donne:

$$\int_{R_0}^R 4\pi R^2 P_e dR = 2\rho\pi R^2 \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 \quad (58)$$

par différentiation, on obtient :

$$4\pi R^2 P_e = 2\pi\rho \left[2R^2 \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 + 2R^3 \left(\frac{d^2R}{dt^2}\right) \right] \quad (59)$$

avec:

$$P_e = \frac{1}{\rho} \left[\frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + R \frac{d^2R}{dt^2} \right] \quad (60)$$

En admettant, dans une première approximation, que la densité de charges superficielles de la bulle dans la direction du champ a pour expression:

$$P_e = \frac{1}{2} [e_0 e_r (e_r - 1)] E^2 \quad (61)$$

En prenant comme valeur du champ (dans un système pointe-plan) celle donnée par deux sphères concentriques:

$$E = \frac{U(L + R_0)}{R(L + R_0 - R)} \quad (62)$$

U: tension appliquée aux électrodes.

L: intervalle inter-électrodes.

R_0 : rayon de l'électrode.

Pour les intervalles étudiés, $R_0 \ll L$, d'où :

$$E \approx \frac{UL}{R(L-R)} \quad (63)$$

En combinant les expressions (I.61), (I.62) et (I.63) on obtient:

$$\frac{1}{2} e_0 e_r (e_r - 1) \left[\frac{UL}{R(L-R)} \right]^2 = \frac{1}{\rho} \left[\frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + R \frac{d^2R}{dt^2} \right] \quad (64)$$

Si la vitesse d'expansion de la bulle est constante ($d^2R/dt^2 = 0$)
On aura:

$$\frac{dR}{dt} = K \frac{UL}{R(L-R)} \quad (65)$$

avec :

$$K = \left[\frac{\epsilon_0 \epsilon_r (\epsilon_r - 1)}{3\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (66)$$

d'où par intégration :

$$R^2(3L - 2R) - R_0^2(3L - 2R_0) = 6LK \int_0^t u \cdot dt \quad (67)$$

Cette expression permet d'obtenir le rayon de la bulle à tout instant. Nous remarquons que R dépend également de la forme de la tension. La bulle aurait atteint l'électrode plane pour $R = L$.

D'après cette expression, on peut déterminer le temps de génération d'une bulle de rayon donné R pour différentes formes de tensions.

3. INFLUENCE DE CERTAINES PROPRIETES PHYSIQUE DES LIQUIDES:

3.1. Influence de la viscosité:

L'action de la viscosité porte essentiellement sur la mobilité des porteurs de charges créés dans le liquide [43]. Les lois de l'électrohydrodynamique prévoit une diminution de la mobilité lorsque la viscosité accrue.

L'effet de la viscosité sur la vitesse de propagation est négligeable dans une large gamme allant de 10cst à 10⁴cst, quoique certains auteurs ont observé un léger ralentissement de la vitesse et certains changements dans la forme des streamers. Pour des polybutènes dont la viscosité variait entre 90 et 4.10⁵cst à une température de 20°C, aucun effet n'a été observé sur le temps de génération du streamer [12,30].

Par contre l'effet électro-visqueux est accru avec l'augmentation de l'intensité du champ électrique et de la permittivité [44].

Par ailleurs, Sokolov et Sosinski ont mentionné un grand effet électrovisqueux ($\Delta\eta/\eta > 1$, où η est la viscosité apparente du liquide) dû à l'intensité du champ électrique et à la conductivité [44]. Ils trouvent que l'augmentation dans la viscosité apparente est proportionnelle à la tension appliquée et à la racine carrée de la conductivité; ils ont ainsi conclu que l'effet électrovisqueux est plutôt dépendant de la conductivité du liquide et non de sa permittivité, contrairement à ce qui a été rapporté précédemment. Contrairement à l'idée admise [5], le temps de génération t_g (supposé comme étant le temps nécessaire à une injection unipolaire des charges) n'est pas proportionnel à la viscosité.

En effet, Béréal [45] n'a observé aucune croissance de t_g avec la viscosité η . Ce qui remettrait en question l'intervention de mécanisme de cavitation induit par mouvement électrohydrodynamique.

3.2 Influence de la masse volumique(ρ):

La variation de la vitesse des streamers en fonction de la masse volumique d'un liquide est pratiquement négligeable; celle-ci varie d'ailleurs relativement peu d'un liquide à un autre. Aucune corrélation entre les propriétés des steamers et la masse volumique n'a pu être observée; contrairement au cas des gaz où la tension de claquage est fortement affectée par le nombre de molécules soumises au champ (loi de Paschen) et sur lequel la pression a une grande influence (la masse volumique peut augmenter d'un facteur de 100 et plus).

4. INFLUENCE DES VARIABLES D'ETAT:

4.1. Influence de la pression :

Il est connu depuis longtemps que la pression a un effet considérable sur la tension de claquage des diélectriques liquides; celle-ci est d'autant plus élevée que la pression est accrue. De même qu'il a été mis en évidence [46]; l'énorme influence de la pression sur l'apparition et le développement du streamer; ce qui a conduit plusieurs auteurs [8,12,16,33,34,42] à assimiler le streamer à une phase gazeuse ou tout au moins à une phase de faible densité [28].

L'application d'une modeste pression (1.5 bar) dans le cyclohexane permet de faire disparaître le streamer, le courant et la lumière émise [46] alors qu'une pression beaucoup plus élevée serait nécessaire à la disparition d'un streamer positif. Ceci va dans le sens des résultats rapportés concernant le claquage.

La tension de claquage croît de façon remarquable quand la pression augmente sans indication de saturation en polarité négative; cette croissance est bien moins rapide et tendrait à disparaître en polarité positive [5].

Cette forte dépendance de la pression en polarité négative indique que le mécanisme de bulles est dominant. En polarité positive ce seraient surtout les processus électroniques qui dominent, sans pour autant exclure les mécanismes gazeux.

L'effet des pressions sub-atmosphériques (10^{-4} à 1atm) [28] semble n'avoir aucune influence sur la vitesse du streamer, alors que sous forte pression les streamers positifs et négatifs deviennent plus ramifiés et par conséquent plus rapide. La possibilité d'obtenir un streamer supersonique augmente avec la pression ou/et la tension [33], dans les deux polarités.

4.2. Influence de la température :

Les phénomènes prédisruptifs sont peu ou pas du tout altérés par l'effet de la température. Devins et al [28] n'ont observé aucun effet des températures (entre 22⁰C et 94⁰C) sur le marcol 70 en polarité négative, alors que la vitesses des streamers positifs tend à croître avec l'augmentation de la température.

Il a été observé par Kao et Higham [12] que la rigidité diélectrique s'améliore légèrement avec la diminution de la température; l'accroissement de celle-ci est de l'ordre de 30% pour des températures entre -60⁰C et 60⁰C [12].

Par ailleurs A.Béroual et al [47] n'ont observé aucun effet de la température sur la tension de génération des streamers dans le cyclohexane en phase liquide; sauf une légère augmentation de l'amplitude, du nombre de pics de courant et de la lumière émise avec la température. Par contre en menant le cyclohexane à l'état solide, le champ nécessaire à l'obtention des pics de courant de même type que ceux observés en phase liquide serait beaucoup plus important.

5. CONCLUSION:

Il ressort de cette analyse que des deux phases de propagation et de génération du streamer, cette dernière reste la moins étudiée, quoique c'est d'elle que dépendrait les processus donnant naissance à la propagation du streamer. Ceci s'explique par le fait que la phase de génération est relative aux tous premiers instants d'application de la tension, d'où des problèmes de détection et d'enregistrement des phénomènes.

-Le streamer peut prendre naissance suite à des processus gazeux (thermique ou de cavitation) ou/et purement électronique (par ionisation ou émission de champ).

-Les propriétés physico-chimiques des liquides ainsi que les paramètres géométriques et électriques du système influent sur la forme et la grandeur de la vitesse du streamer, du courant correspondant et de la lumière émise.

-Il est établi que dans plusieurs liquides, une relation étroite existe entre la forme du streamer, sa vitesse de propagation, les courants et la lumière émise quelle que soit la polarité de la pointe dans un système pointe-plan.

-L'effet de certains additifs est remarquable sur la vitesse des streamers.

Le circuit d'essais est constitué d'une source de tension alternative, d'une cellule d'essais et de dispositif de mesure de courant (figure 1).

II.1 Source de tension:

La tension 50 Hz est fournie par un transformateur (type WALTER) de 100 kV et de puissance apparente $S = 2$ kVA.

II.2 Cellule d'essais:

Elle est constituée en téflon et comporte :
(figure 2) :

- Deux hublots en pyrex de 10 mm de diamètre permettant la visualisation de l'échantillon.

- Deux bouchons en téflon permettant le remplissage ou l'évacuation du liquide à étudier et éventuellement l'application de la pression.

- Une électrode plane (en Duralumin) de 25 mm de diamètre et d'une électrode pointe (en acier dur) dont le rayon de courbure est de 6 μ m.

II.3 Dispositif de mesure de courant:

Le courant correspondant à la perturbation est déduit de la tension mesurée aux bornes d'une résistance non-inductive de 110 k Ω placée en série avec la cellule d'essais ($I = U/R$).

Deux diodes Zener rapides montées en tête-bêche et placées en parallèle avec la résistance de mesure de courant, permettent de protéger l'entrée de l'oscilloscope contre d'éventuelles surtensions.

La forme du courant est enregistrée sur un oscilloscope à mémoire (type PHILLIPS PM 3305 35 MHz).

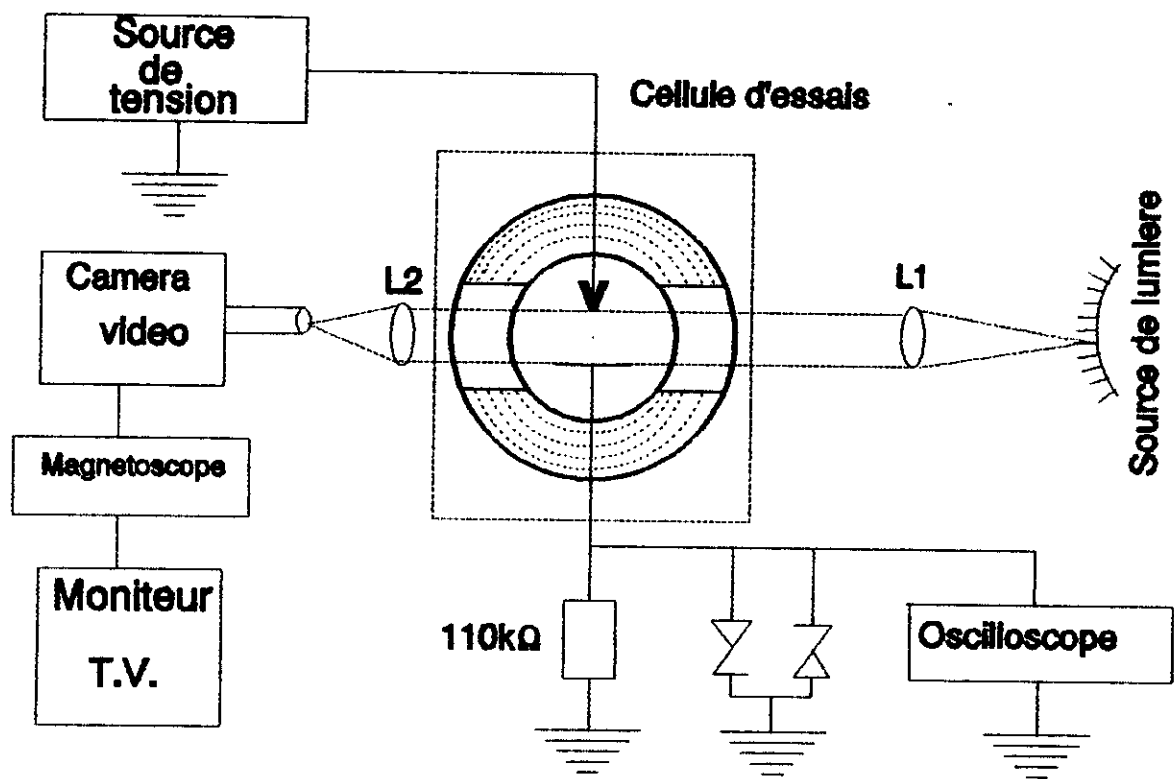


Figure 1 : Dispositif expérimental

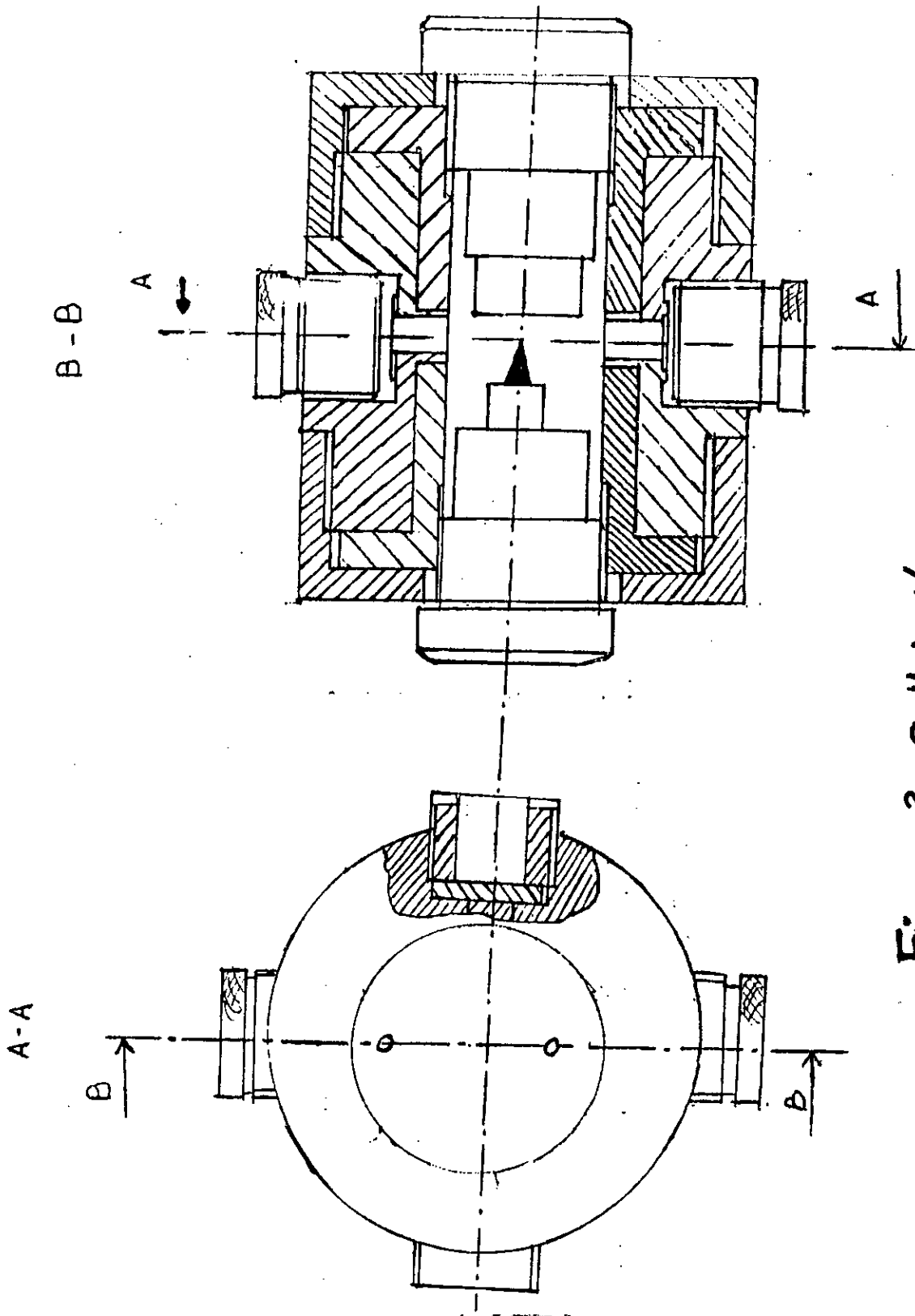


Fig: 2 Cellule D'essais

II.4 Visiualisation des perturbations:

L'image de l'intervalle inter-électrodes est produite sur le tube d'une caméra vidéo (de type CANON) en utilisant deux lentilles L_1 et L_2 .

Une source de lumière de puissance 15 W est utilisée pour illuminer cet intervalle.

II.5 Liquides testés:

Les liquides testés sont : le n-hexane (C_6H_{14}), le benzène (C_6H_6), le cyclohexane (C_6H_{12}), le n-heptane (C_7H_{16}), tétrachlorure de carbone (CCl_4) et le chlorobenzène (C_6H_5Cl).

Remarque: les essais relatifs au chlorobenzène ont été éliminés à cause de la présence d'impuretés.

Les caractéristiques de ces liquides sont données dans le tableau 2:

Liquides testés	ϵ_r	ρ (kg/m ³)	T_{eb} (°K)	C_p (J/kg.°k)	L_v (J/kg)
n-heptane	1.96	684	371.58	2048.2	319561.0
benzène	2.28	879	353.25	1751.42	393505.2
cyclohexane	2.02	779	354.15	1860.1	357808.0
n-hexane	1.89	660	342	1524.028	372438
tétrachlorure de carbone	2.24	1595	350.15	840.18	192280.0
chlorobenzène	5.71	1107	405.25	1287.44	324326.2

Tableau 2 : Caractéristiques des liquides testés

II.6 Mode opératoire:

Avant chaque remplissage, la cellule est nettoyée avec de l'acétone puis séchée dans une étuve à 70°C pendant une heure.

Pour une distance inter-électrodes d , on augmente la tension par paliers de 0.2 kV et pour chaque valeur U , on relève la valeur correspondante du courant I .

La tension du mouvement du liquide est déduite de la visualisation directe de l'image produite par la caméra vidéo.

Plusieurs essais sont réalisés sur un liquide étudié.

Entre chaque essai, ce dernier est laissé au repos pendant un temps moyen d'environ 2 mn.

Les valeurs de la tension et du courant ainsi déterminées sont données par la moyenne arithmétique de deux essais.

CHAPITRE III

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III.1 PRESENTATION DES RESULTATS:

III.1.1 Introduction:

Dans ce chapitre, nous présenterons nos résultats expérimentaux concernant l'influence de paramètres géométriques (distance inter-électrodes), physiques (permittivité, viscosité et nature du liquide) sur la tension et le courant de génération. Nous étudions également l'influence de ces mêmes paramètres sur la tension du mouvement du liquide.

Enfin nous interprétons ces résultats et les comparons à ceux obtenus par d'autres auteurs.

III.1.2 Caractéristiques courant-tension:

Dans tous les liquides testés, pour une distance inter-électrodes donnée, nous constatons que le courant augmente lorsque la tension croît (figures 3 à 6).

— Pour les faibles tensions le courant est proportionnel à U , ($I=C_0U$).

— A partir d'un certain seuil, une diminution de la pente de la caractéristique courant-tension est constatée, ce qui est dû au changement de la capacité donc du milieu physique du liquide.

III.1.3 Détermination de la tension de génération:

Nous appelons tension de génération, la tension correspondant à l'apparition d'une perturbation de l'état physique du liquide au voisinage de l'électrode pointe. Lorsque celle-ci (la perturbation) est générée, la capacité électrique du milieu est altérée, ce qui provoque une variation de la proportionnalité entre le courant et la tension.

Partant de cette remarque, la tension de génération est déterminée de la caractéristique courant-tension lorsque le rapport (I/U) décroît (figures 3 à 6).

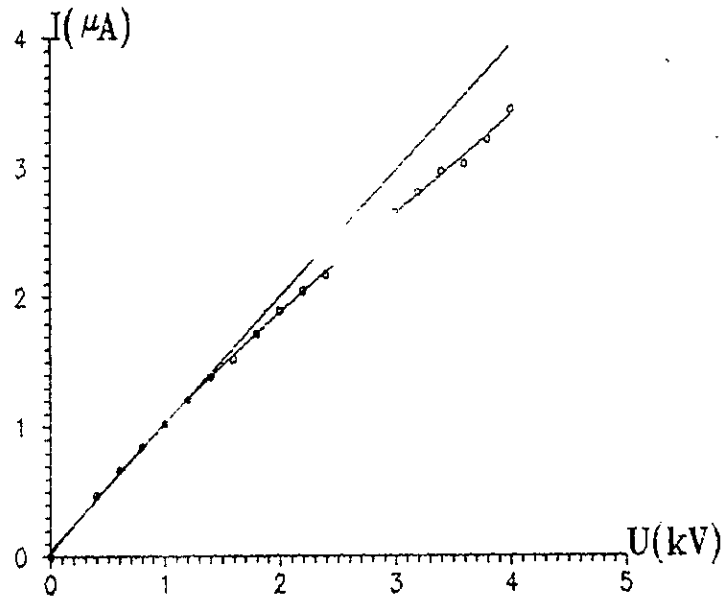


Figure:3 Caracteristique courant-tension pour le n-heptane pour une distance $d=3\text{mm}$

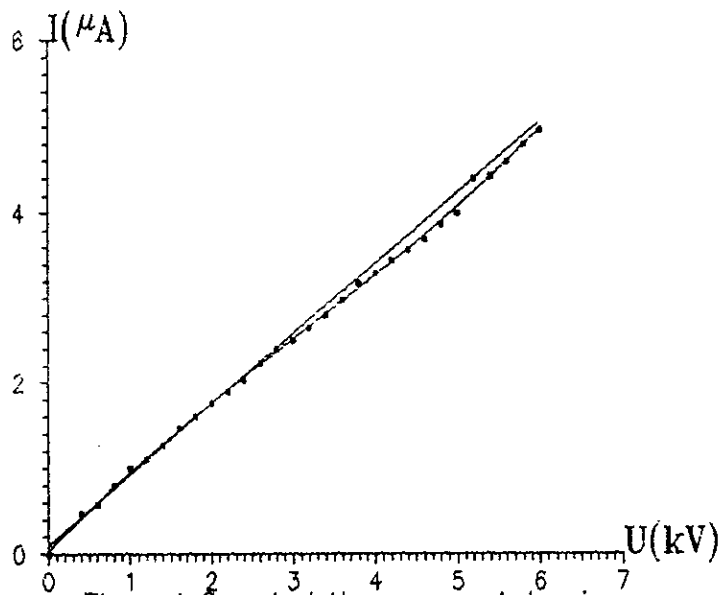


Figure:4 Caracteristique courant-tension pour le n-heptane pour une distance $d=5\text{mm}$

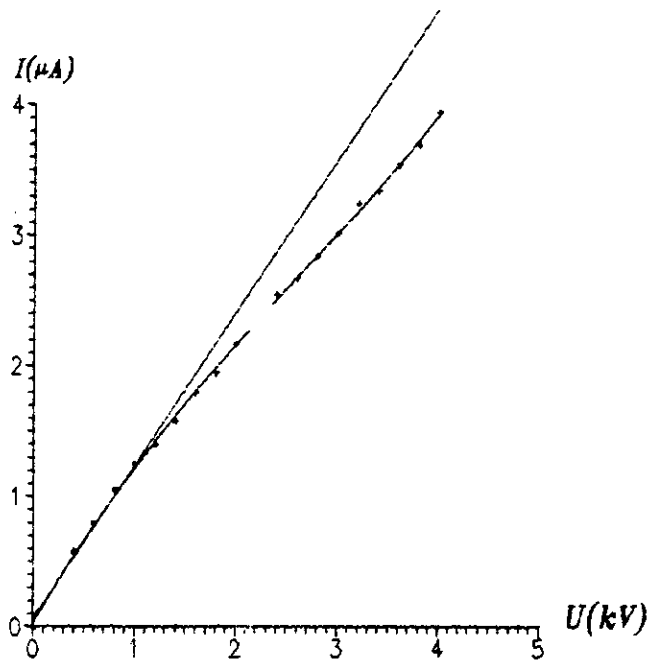


Figure:5 Caracteristique courant-tension dans le tetrachlorure de carbone pour une distance $d=3\text{mm}$

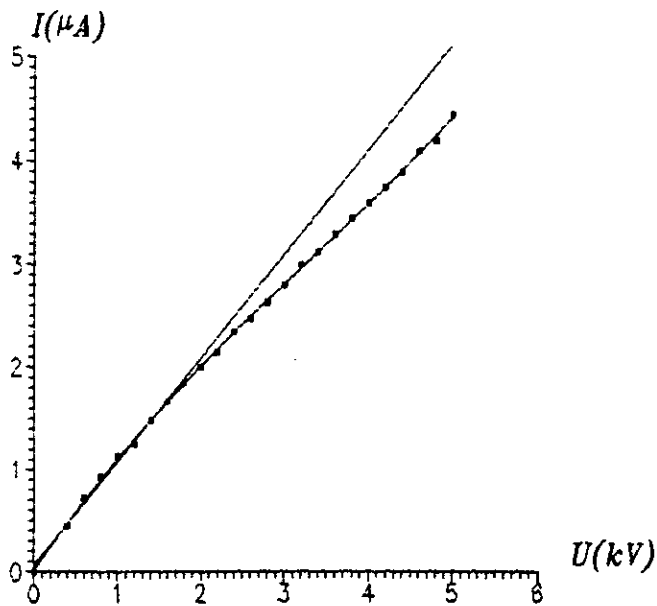


Figure:6 Caracteristique courant-tension pour le tetrachlorure de carbone pour une distance $d=4\text{mm}$

III.1.4 Influence de la distance inter-électrodes sur le courant et la tension de génération:

Les tensions de génération, dans tous les liquides étudiés, sont très peu influencées par la variation de la distance inter-électrodes (figures 7 à 11), ce qui est en accord avec les résultats obtenus par d'autres auteurs en tension continue, dans le cas d'une pointe négative [18]. Toutefois, les tensions de génération en alternative sont plus faibles qu'en tension continue [18]. De même, les courants de génération restent constants lorsque la distance inter-électrodes croît (figures 12 à 16). Donc la génération dans les diélectriques liquides a lieu lorsque le courant capacitif atteint une valeur seuil. Ce qui montre que le champ électrique sur l'électrode pointe joue un rôle important lors de la génération.

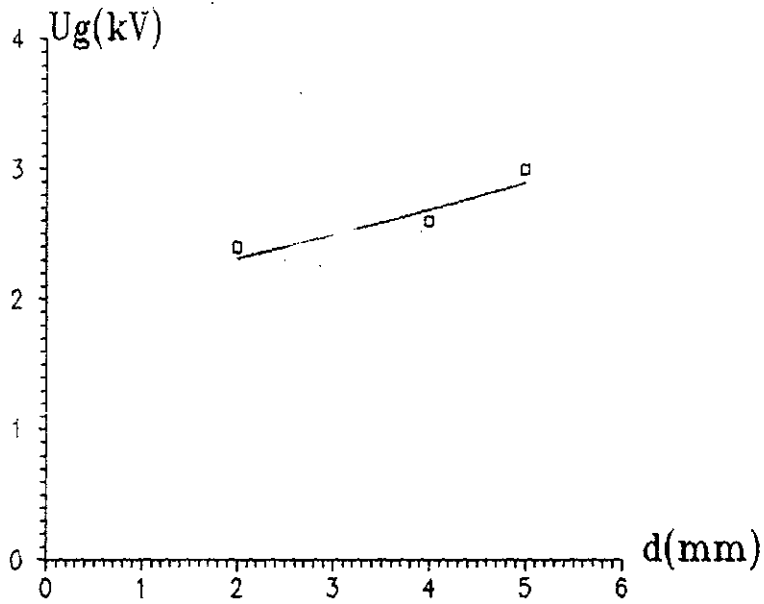


Figure:7 Tension de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le Tetrachlorure de carbone

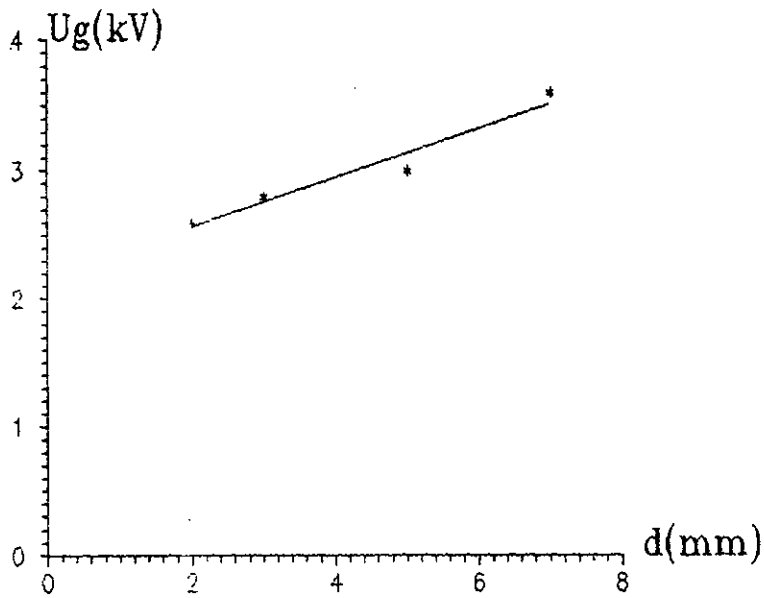


Figure:8 Tension de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le n-heptane

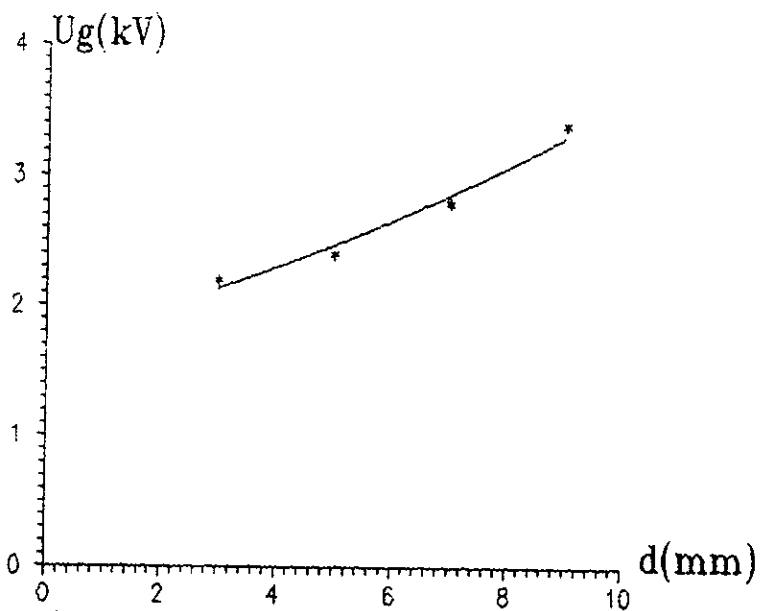


Figure:9 Tension de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le Benzene

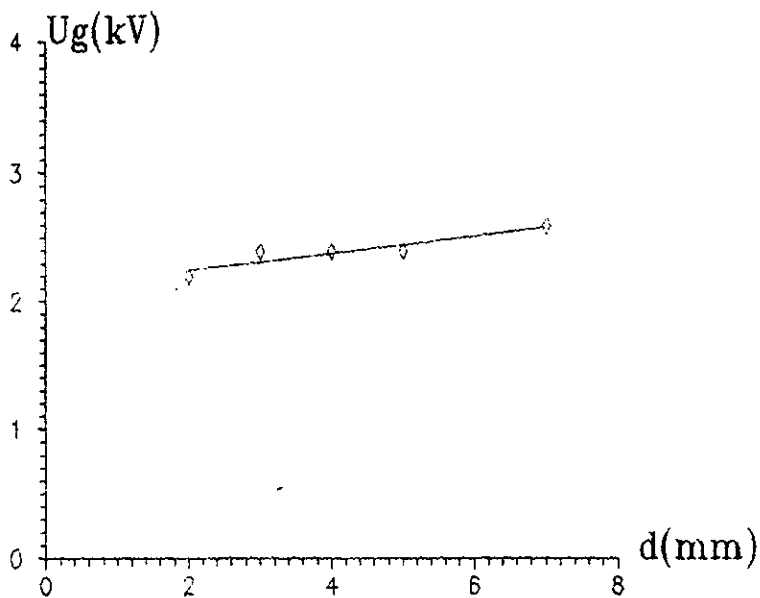


Figure:10 Tension de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le cyclohexane

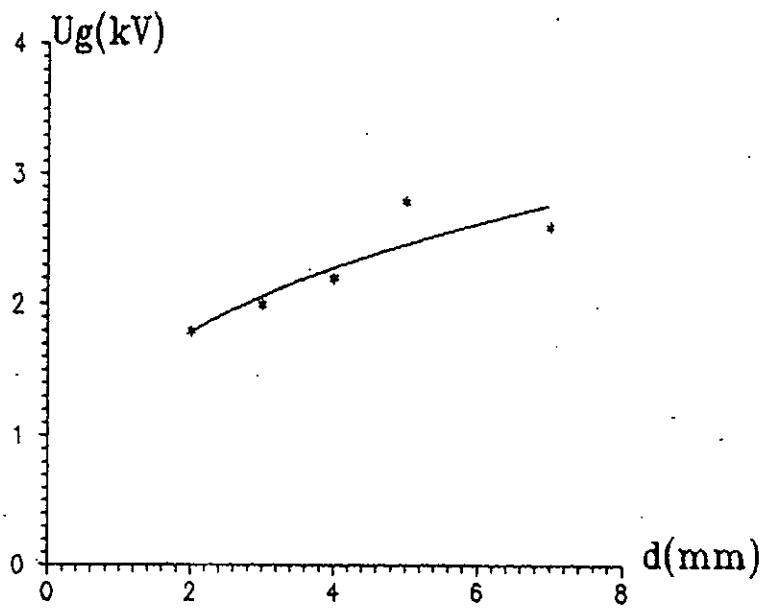


Figure:11 Tension de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le n-hexane

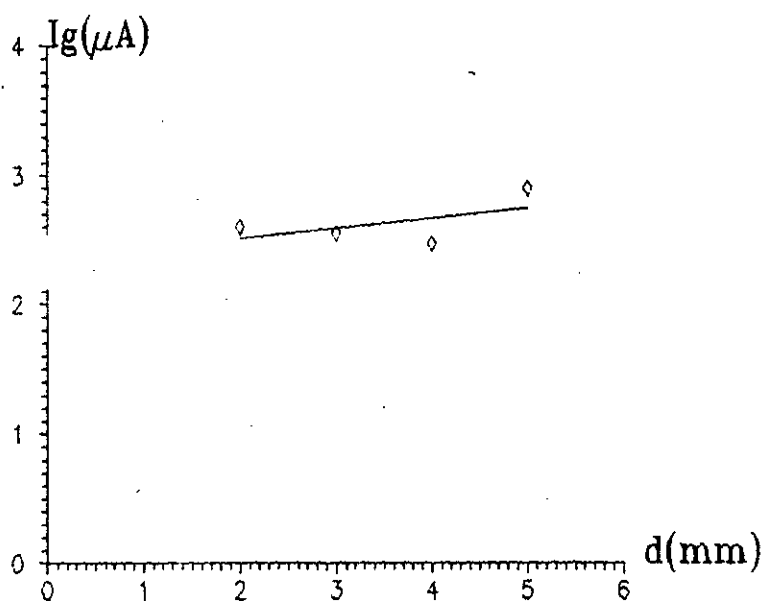


Figure:12 Courant de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le Tetrachlorure de carbone

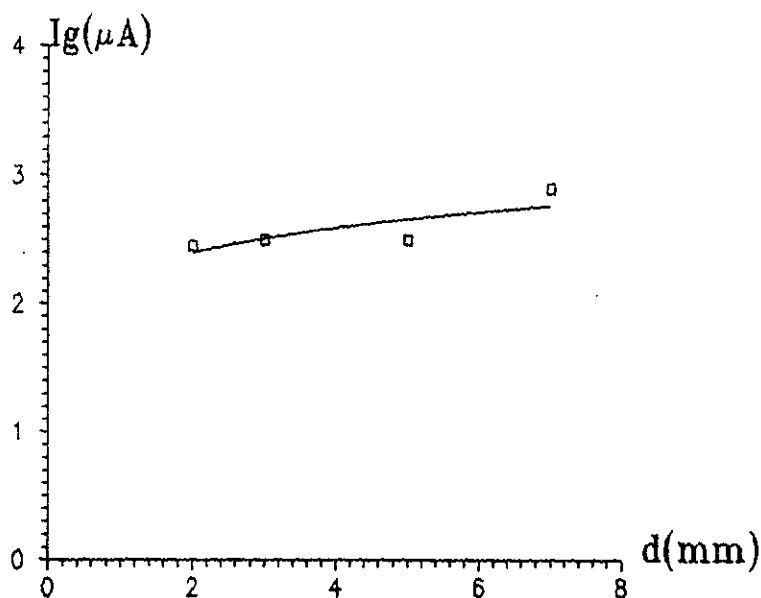


Figure:13 Courant de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le n-heptane

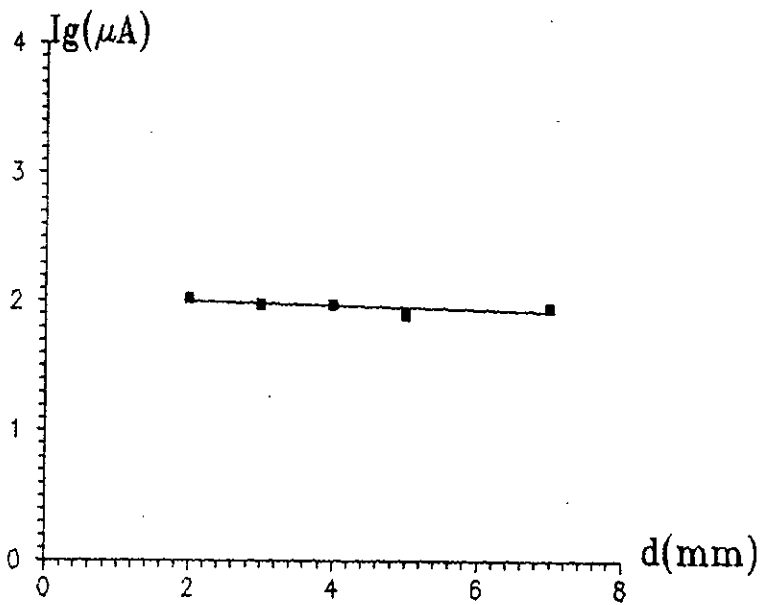


Figure:14 Courant de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le cyclohexane

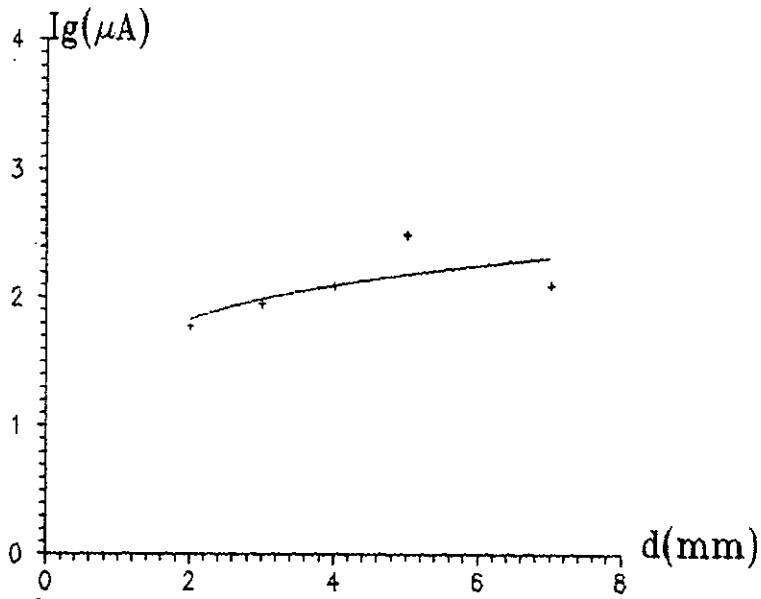


Figure:15 Courant de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le n-hexane

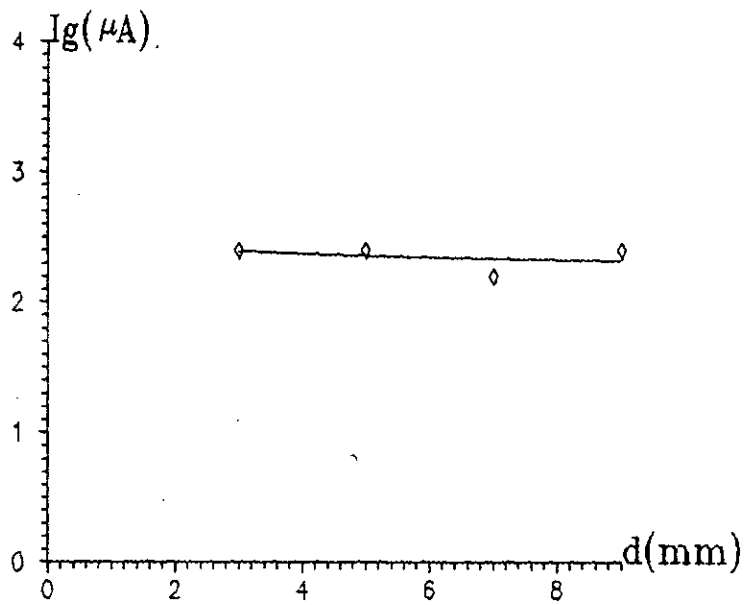


Figure:16 courant de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le Benzene

III.1.5 Influence de la nature du liquide:

La tension et le courant de génération dépendent de la structure du liquide et de ses caractéristiques thermiques. Les courants de génération dans les liquides testés sont comparables, car leur caractéristiques électriques (permittivité) sont proches (Tableau 3).

Liquides testés	Permittivité relative ϵ_r	Tension de génération en (kV)	Courant de génération en (μ A)
n-hexane	1.89	2.0	2.0
n-heptane	1.96	2.8	2.5
cyclohexane	2.02	2.4	2.0
tétrachlorure de carbone	2.24	2.4	2.6
benzène	2.28	2.2	2.4

Tableau 3: Courant et tension de génération pour les liquides étudiés, pour une distance inter-électrodes $d=3\text{mm}$.

Toutefois, lors des essais préliminaires, effectués avec le chlorobenzène ($\epsilon_r = 5.71$), les courants obtenus étaient beaucoup plus importants que ceux présentés dans le travail. Ce qui est en faveur de l'intervention de phénomènes de dissociation par effet de champ. On remarque aussi que les tensions et courants de génération restent comparables pour des viscosités variant de 0.50 à 1.28 cst (Tableau 4). Ceci serait dû:

_ Soit à la variation de la viscosité lors de l'application de la tension, en effet d'après les observations faites dans la littérature, cette dernière (la viscosité) est très sensible à la variation de la température.

Chapitre III-RESULTATS ET INTERPRETATIONS

_ Ou bien, à l'intervention de mécanismes (vaporisation) autre que la cavitation induite par des phénomènes électrohydrodynamiques.

Liquides testés	viscosité cinématique à 20°C (en cst)	Tension de génération en (kV)	Courants de génération en (kV)
n-hexane	0.50	2.0	2.0
n-heptane	0.63	2.8	2.5
tétrachlorure de carbone	0.63	2.2	2.0
benzène	0.74	2.4	2.6
cyclohexane	1.28	2.4	2.4

Tableau 4: Tension et Courant de génération en fonction de la viscosité pour une distance inter-électrodes $d=3\text{mm}$

III.1.6 Tension de mouvement du liquide:

Il est à signaler que les moyens dont nous disposons (Camera ordinaire) ne nous permettent pas de faire des mesures très précises concernant la tension de mouvement.

Les résultats obtenus montrent que la tension du mouvement augmente lorsque la distance inter-électrodes croit quelque soit le liquide testé (figures 17 à 21).

Par ailleurs nous constatons que les tensions de mouvement sont comparables pour des viscosités variant de 0.5 à 1.28 cst (Tableau 5).

Liquides testés	viscosité cinématique à 20°C en (cst)	Tension de mouvement du liquide en (kV)
n-hexane	0.50	10.6
n-heptane	0.63	14 ÷ 16.4
tétrachlorure de carbone	0.63	9.4 ÷ 10
chlorobenzene	0.81	9.6 ÷ 10
cyclohexane	1.28	9.3 ÷ 14.3

Tableau 5: Tension de mouvement du liquide en fonction de la viscosité pour une distance inter-électrodes d=5mm

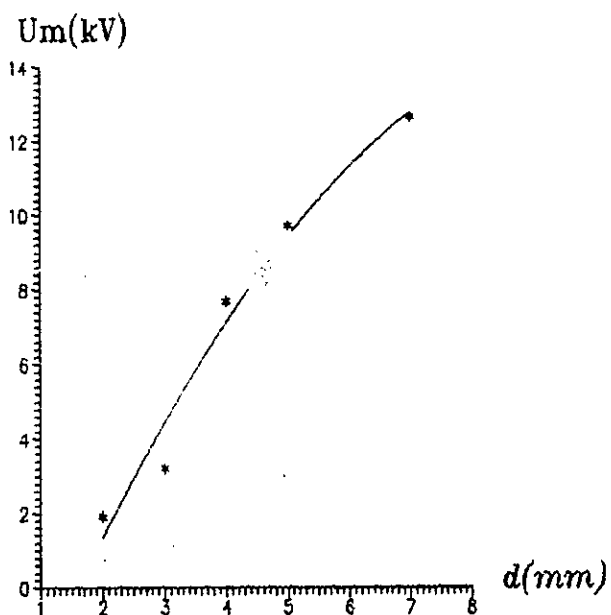


Figure:17 tension de mouvement en fonction de la distance inter-electodes pour le chlorobenzene

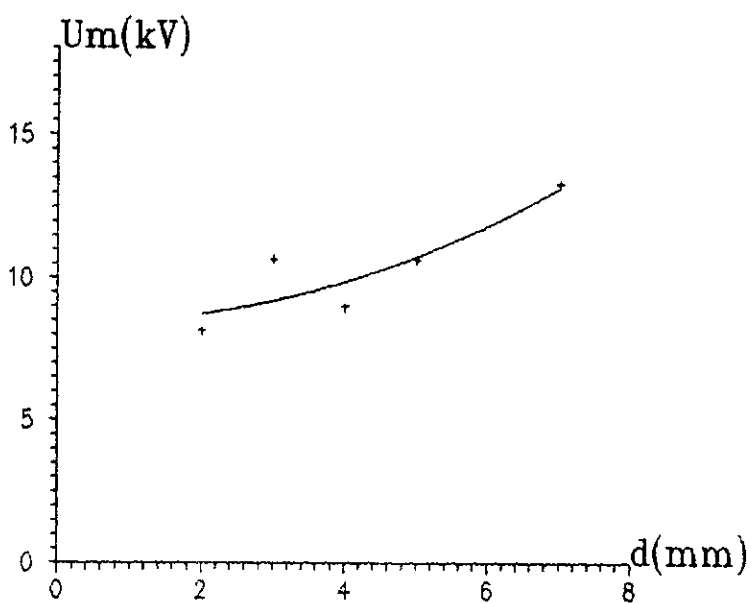


Figure:18 Variation de la tension de mouvement en fonction de la distance inter-electodes pour le n-hexane

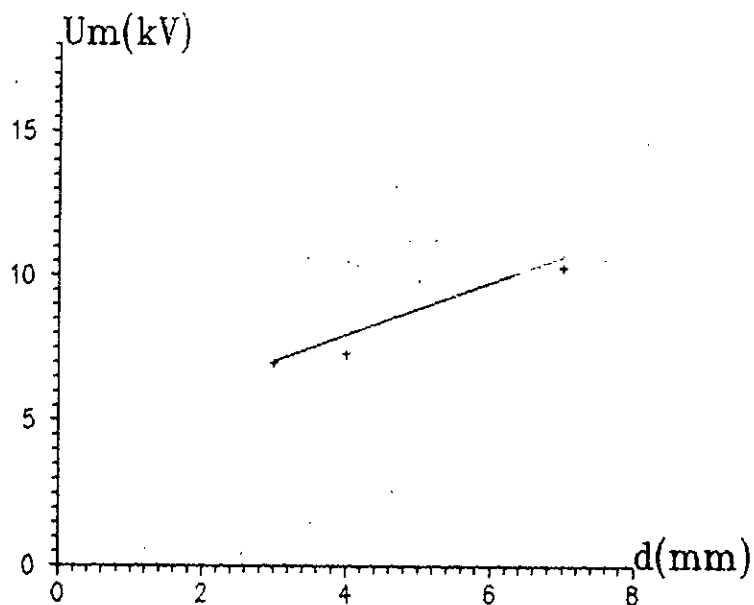


Figure:19 Variation de la tension de mouvement en fonction de la distance inter-electrodes pour le cyclohexane

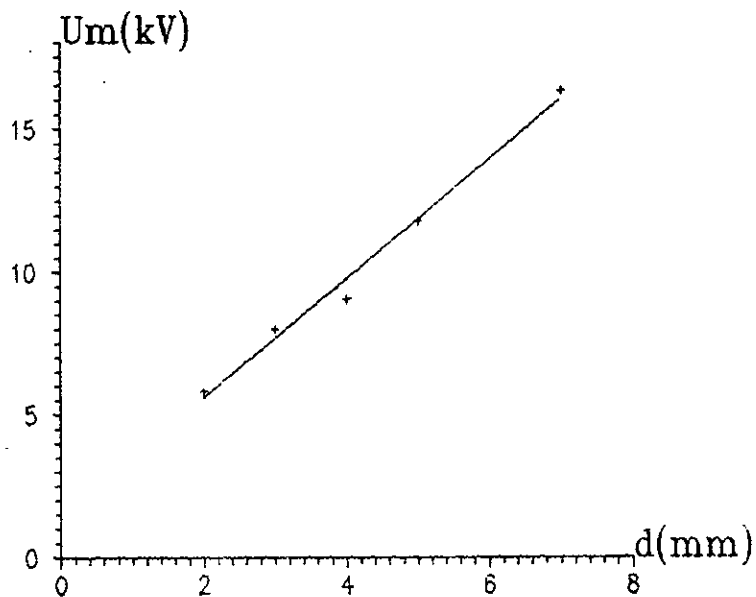


Figure: 20 Variation de la tension de mouvement en fonction de la distance inter-electrodes pour le tetrachlorure de carbone

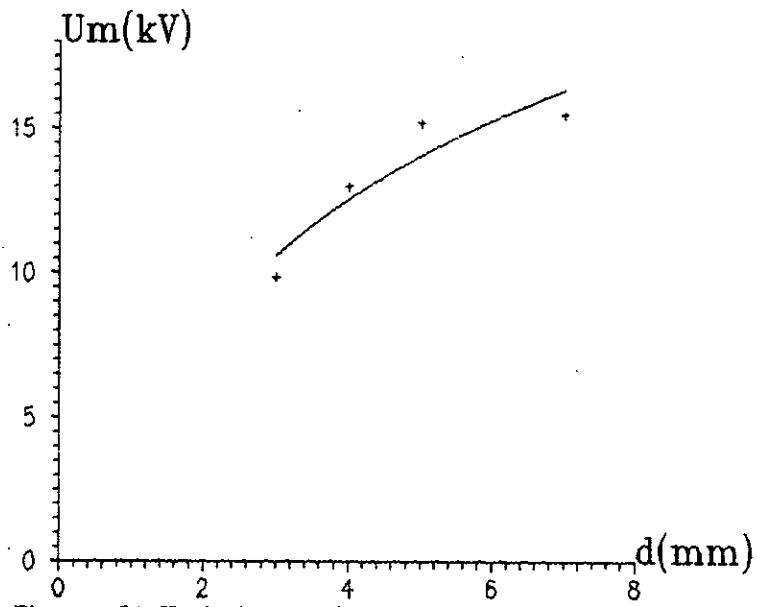


Figure: 21 Variation de la tension de mouvement en fonction de la distance inter-electrodes pour le n-heptane

III.2 DISCUSSION ET INTERPRETATION DES RESULTATS:

III.2.1 Nature physique de la perturbation:

Les résultats expérimentaux obtenus sont en faveur de l'intervention d'une phase gazeuse, lors de la génération dans les diélectriques liquides sous tension alternative 50Hz. Ce qui est en accord avec les résultats obtenus par Béréal et Al [12,33], Denat et Al [15] et Lesaint et Al [25] respectivement sous tension impulsionnelle, continue et alternative.

En effet, la diminution de la pente de la caractéristique courant-tension est la conséquence du changement d'état physique du liquide et ne peut être produite que par l'intervention d'une cavité gazeuse.

L'expression du courant capacitif est donné par:

$$i = c \frac{du}{dt} + u \frac{dc}{dt} \quad (68)$$

avant la génération la capacité C est constante donc

$$i = c \frac{du}{dt} \quad (69)$$

en considérant

$$U = U_m \sin \omega t \quad (70)$$

$$i = C \omega U_m \cos \omega t \quad (71)$$

$$I_m = C \omega U_m \Rightarrow \frac{I_m}{U_m} = C \omega \quad (72)$$

le rapport (I_m/U_m) est constant avant la génération.

III.2.2 Effet du champ électrique:

On considère le champ électrique de génération sur l'électrode pointe donnée par l'approximation hyperboloïde de notre système pointr-plan:

$$E_g = \frac{2U_g}{r_p \ln\left(\frac{4d}{r_p}\right)} \quad (73)$$

avec:

E_g : champ électrique de génération.

U_g : tension de génération.

r_p : rayon de courbure de la pointe.

_ Pour un rayon de courbure donné, le champ électrique de génération est peu sensible à la variation de la distance inter-électrodes d dans la gamme des intervalles étudiés (figures 22 à 26).

Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par S.BOUAZABIA [18] en tension continue et A.BEROUAL [12] en creneau de tension.

_ Nous pouvons donc affirmer que le champ électrique sur la pointe a un rôle prépondérant lors de la génération d'une cavité gazeuse dans les diélectriques liquides sous tension alternative 50Hz. Toutefois, pour mieux voir l'effet de ce dernier une étude expérimentale faisant varier le rayon de courbure r_p serait souhaitable.

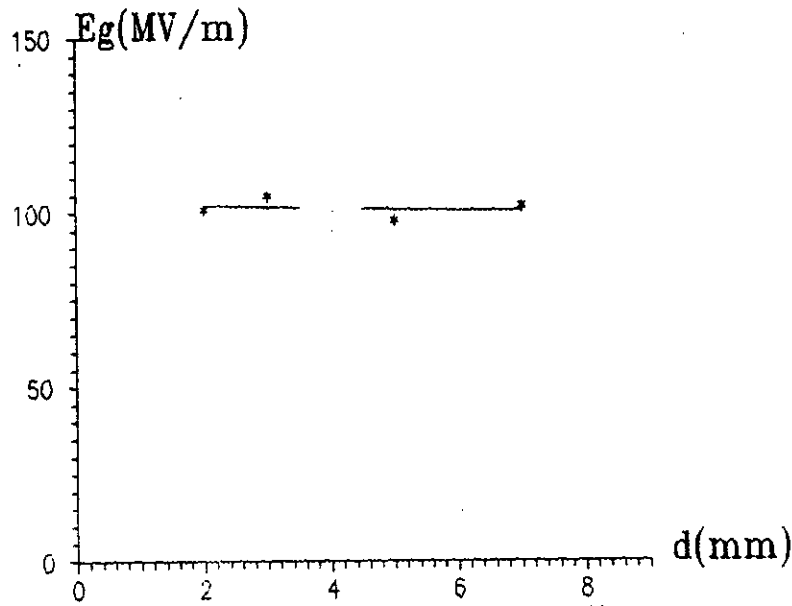


Figure: 22 Variation du champ de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le cyclohexane

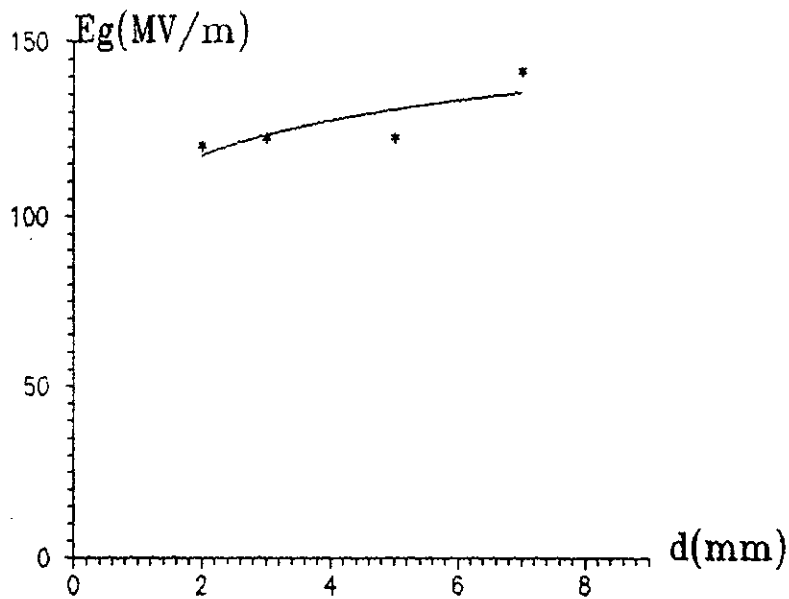


Figure: 23 Variation du champ de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le n-heptane

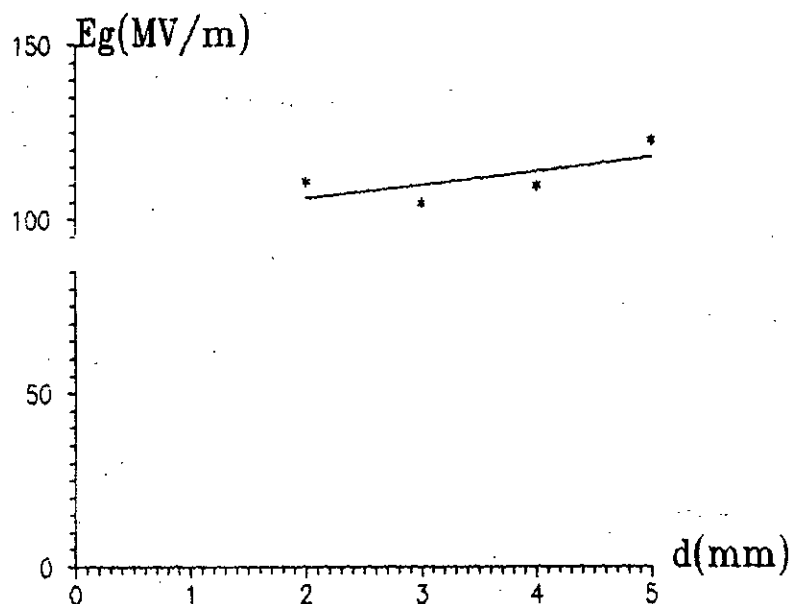


Figure: 24 Variation du champ de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le tetrachlorure de carbone

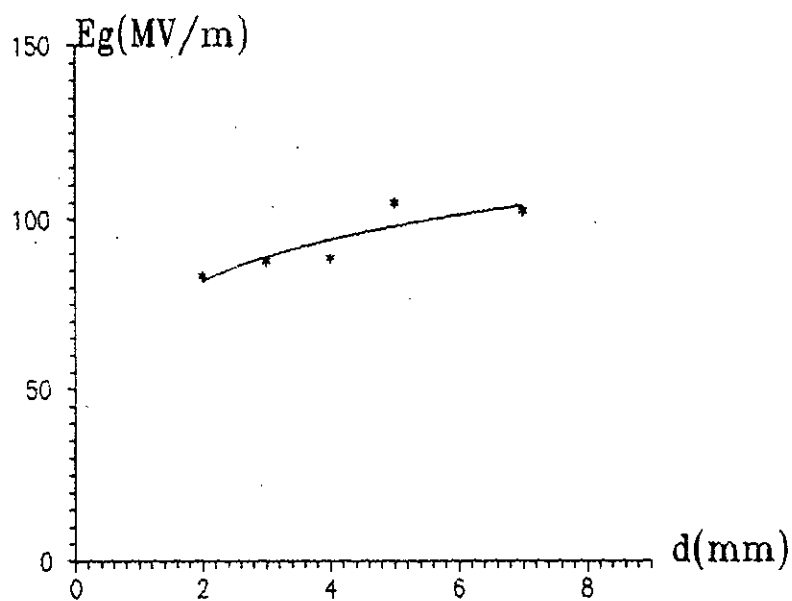


Figure: 25 Variation du champ de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le n-hexane

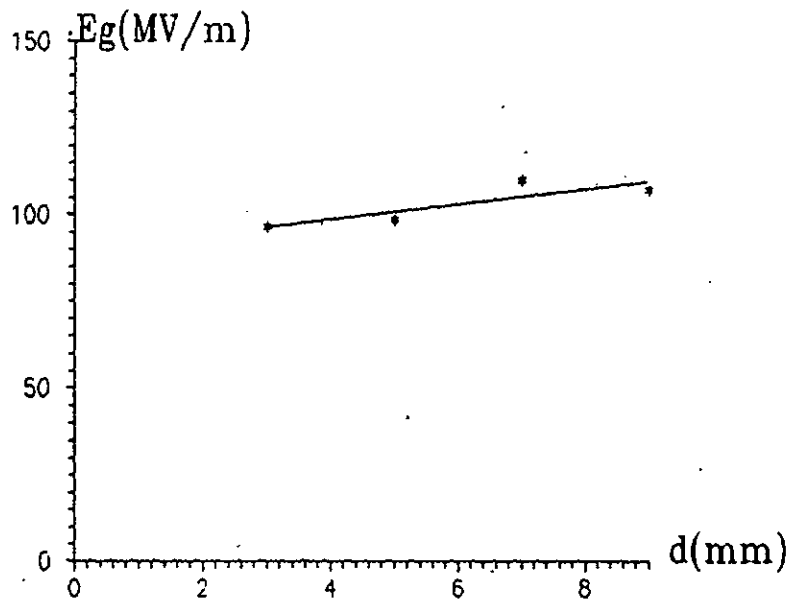


Figure: 26 Variation du champ de generation en fonction de la distance inter-electrodes pour le Benzene

III.2.4 Mouvement du liquide:

Le liquide prend un mouvement lorsqu'il est soumis, dans certaines conditions, à un champ électrique. Le champ électrique sur la pointe correspondant au mouvement du liquide est donné, lorsque on prend l'approximation hyperboloïde, par:

$$E_m = \frac{2U_m}{r_p \ln\left(\frac{4d}{r_p}\right)} \quad (74)$$

U_m : La tension pour laquelle le liquide se met en mouvement.

Les figures(27 à 30) montrent que le champ E_m croit lorsque la distance inter-électrodes augmente.

— La génération dans les liquides étudiés a lieu pour des tensions et des champs beaucoup plus faibles que celles du mouvement ce qui rend l'intervention du mécanisme de cavitation peu probable lors de la génération.

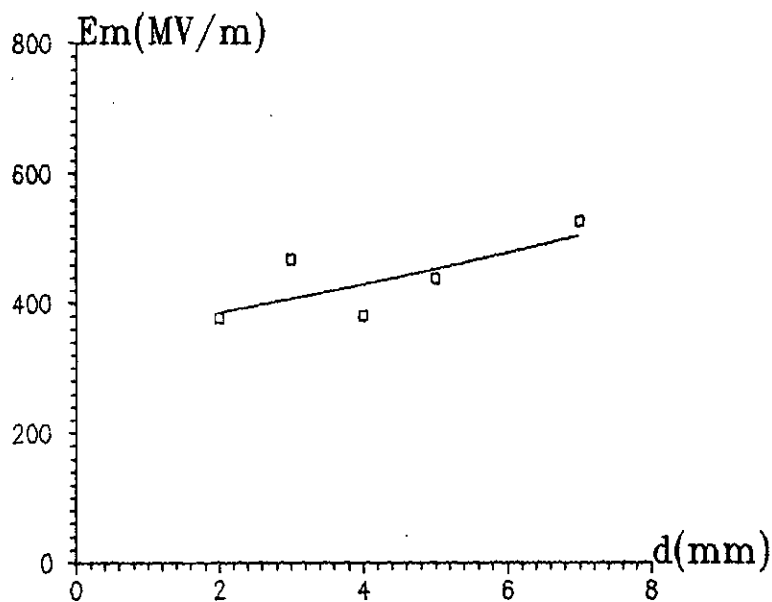


Figure: 27 Variation du champ de mouvement en fonction de la distance inter-electrodes pour le n-hexane

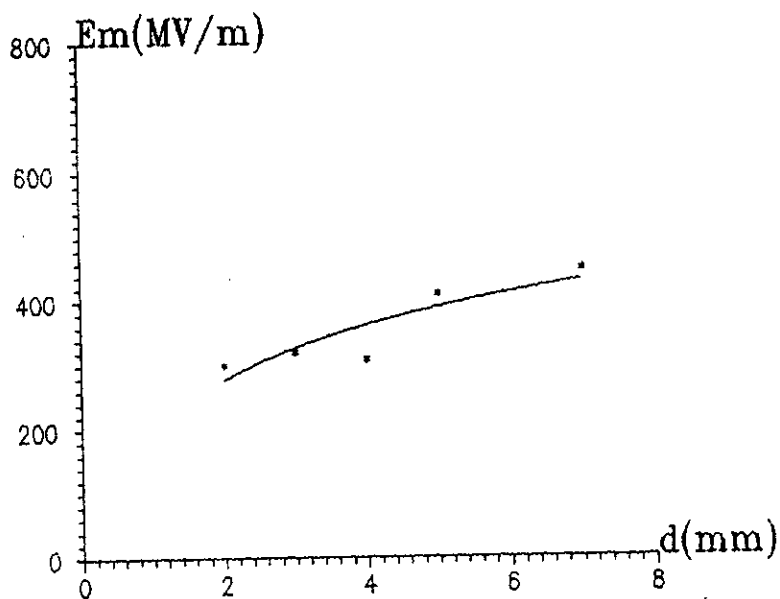


Figure: 28 Variation du champ de mouvement en fonction de la distance inter-electrodes pour le cyclohexane

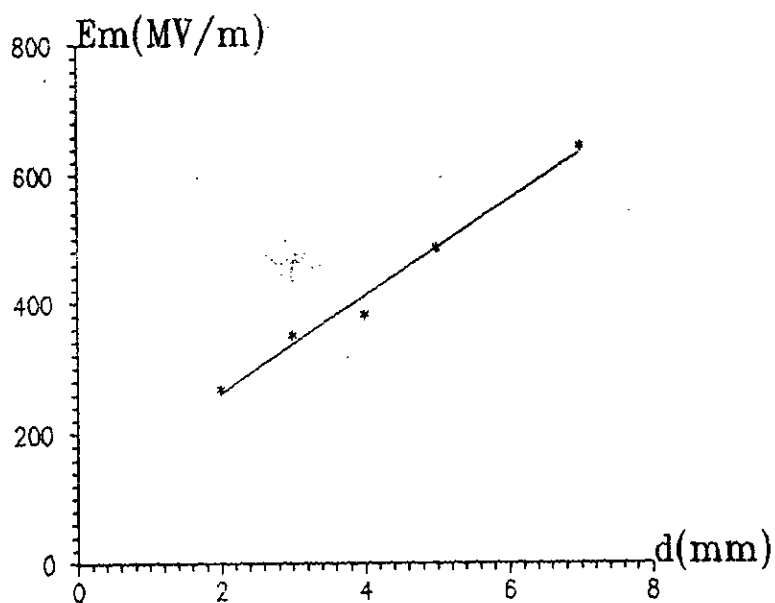


Figure: 29 Variation du champ de mouvement en fonction de la distance inter-electrodes pour le tetrachlorure de carbone

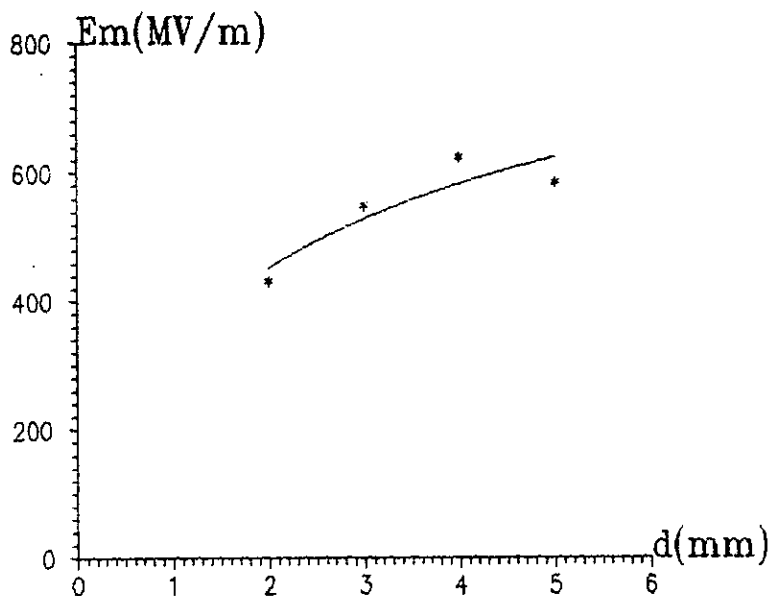


Figure: 30 Variation du champ de mouvement en fonction de la distance inter-electrodes pour le n-heptane

... of the ...
... and ...
... relative ...

... tray ...
... Boston ...
... from ...

...
...
...
...

PERSPECTIVES

...
...
...
...
...

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Au cours de ce travail nous avons étudié les phénomènes de génération dans des liquides à structure chimique simple dans un système pointe-plan sous tension alternative (50Hz).

* Il ressort de notre étude que la perturbation générée au voisinage de l'électrode pointe est de nature gazeuse.

* la tension et le courant de génération sont très peu influencées par la variation de la distance inter-électrodes, ce qui confirme que le champ électrique sur la pointe joue un rôle important dans la génération.

* Les courants et les tensions de génération pour les liquides étudiés sont comparables car leurs caractéristiques électrique (permittivité) et thermique (énergie de vaporisation) sont proches.

* Les courants trouvés pour le chlorobenzène sont plus importants car sa permittivité est la plus grande ce qui est en faveur de l'intervention du phénomène de dissociation par effet de champ.

* La viscosité des liquides testés semble ne pas avoir d'effet prépondérant lors de la génération et lors du mouvement du liquide ce qui suggère l'intervention d'autres mécanismes autres que la cavitation due aux écoulements électrohydrodynamiques à savoir la vaporisation locale du liquide ou les effets de champs.

* Les tensions pour lesquelles on a mouvement du liquide sont beaucoup plus importantes que celle de la génération.

ANNEXE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail nous a permis, d'améliorer nos connaissances sur les phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides. Cependant, il demande à être approfondi davantage, par la réalisation des analyses chromatographiques en temps réel avec une spectroscopie de lumière émise par la perturbation, afin d'étudier les différents produits générés.

Il est aussi souhaitable que le système de visualisation soit amélioré de façon à pouvoir observer d'une manière satisfaisante les phénomènes qui s'y produisent durant la phase de préclaquage et claquage.

Pour le laboratoire, nous souhaitons l'acquisition d'un oscilloscope à mémoire plus performant, et d'une caméra ultra-rapide.

d (mm)	2	3	4	5	7
U (kV)	I (μ A)				
0.4	0.50	0.48	0.47	0.47	0.40
0.6	0.73	0.66	0.77	0.58	0.53
0.8	0.85	0.85	0.87	0.80	0.70
1.0	1.11	1.03	1.03	1.00	0.90
1.2	1.26	1.21	1.20	1.10	1.08
1.4	1.45	1.39	1.43	1.27	1.30
1.6	1.60	1.52	1.53	1.47	1.40
1.8	1.80	1.71	1.75	1.60	1.50
2.0	2.00	1.89	1.87	1.75	1.65
2.2	2.15	2.04	2.05	1.90	1.85
2.4	2.38	2.18	2.25	2.03	1.95
2.6	2.46	2.36	2.40	2.23	2.13
2.8	2.61	2.51	2.53	2.40	2.35
3.0	2.82	2.65	2.67	2.50	2.40

Tableau 1: Variations du courant en fonction de la tension appliquée pour différentes distances.

a:n-heptane

d (mm)	2	3	4	5	7
U (kV)	I (μ A)				
0.4	0.28	0.43	0.50	0.40	0.35
0.6	0.70	0.66	0.70	0.62	0.55
0.8	0.82	0.88	0.86	0.78	0.70
1.0	1.12	1.07	1.10	1.00	0.90
1.2	1.23	1.23	1.20	1.20	1.00
1.4	1.48	1.38	1.40	1.40	1.20
1.6	1.58	1.58	1.60	1.50	1.35
1.8	1.78	1.78	1.80	1.68	1.50
2.0	1.98	1.92	2.05	1.90	1.60
2.2	2.15	2.13	2.15	2.08	1.80
2.4	2.28	2.25	2.28	2.15	2.00
2.6	2.48	2.47	2.50	2.35	2.10
2.8	2.62	2.57	2.60	2.50	2.25
3.0	2.82	2.77	2.80	2.63	2.40

Tableau 2: Variations du courant en fonction de la tension appliquée pour différentes distances.

b:n-hexane

d (mm)	2	3	4	5	7
U (kV)	I (μ A)				
0.4	0.45	0.35	0.38	0.35	0.38
0.6	0.73	0.60	0.60	0.57	0.53
0.8	0.93	0.75	0.75	0.72	0.68
1.0	1.08	0.95	1.00	0.94	0.90
1.2	1.23	1.08	1.10	1.03	1.00
1.4	1.40	1.23	1.28	1.15	1.15
1.6	1.60	1.40	1.38	1.30	1.28
1.8	1.73	1.55	1.60	1.47	1.43
2.0	1.98	1.75	1.73	1.58	1.60
2.2	2.03	1.83	1.93	1.83	1.78
2.4	2.20	1.98	1.98	1.90	1.85
2.6	2.40	2.13	2.18	2.03	1.95
2.8	2.53	2.25	2.33	2.18	2.08
3.0	2.73	2.45	2.48	2.32	2.23

Tableau 3: Variations du courant en fonction de la tension pour différentes distances.
c:cyclohexane

d(mm)	2	3	4	5	7
U(kV)	I(μA)				
0.4	0	0.58	0.45	0.43	0.40
0.6	0.80	0.80	0.73	0.68	0.63
0.8	1.00	1.05	0.93	0.80	0.80
1.0	1.23	1.25	1.13	1.03	1.00
1.2	1.43	1.40	1.25	1.18	1.13
1.4	1.60	1.58	1.48	1.40	1.33
1.6	1.83	1.80	1.68	1.55	1.50
1.8	2.00	1.95	1.85	1.75	1.60
2.0	2.25	2.18	2.00	1.93	1.83
2.2	2.40	2.35	2.15	2.05	1.95
2.4	2.60	2.55	2.35	2.28	2.18
2.6	2.80	2.64	2.48	2.45	2.28
2.8	3.00	2.85	2.63	2.65	2.40
3.0	3.15	3.03	2.80	2.78	2.60

Tableau 4: Variations du courant en fonction de la tension appliquée pour différentes distances.
d:tétrachlorure de carbone

d (mm)	3	5	7	9
U (kV)	I (μ A)			
0.4	0.42	0.48	0.48	0.37
0.6	0.70	0.72	0.68	0.58
0.8	0.90	0.92	0.80	0.75
1.0	1.13	1.13	1.00	0.95
1.2	1.25	1.28	1.67	1.10
1.4	1.50	1.50	1.35	1.30
1.6	1.82	1.70	1.50	1.40
1.8	2.10	1.85	1.65	1.60
2.0	2.20	2.05	1.83	1.77
2.2	2.40	2.28	2.00	1.92
2.4	2.62	2.40	2.38	2.08
2.6	2.75	2.60	2.43	2.28
2.8	2.97	2.75	2.57	2.40
3.0	3.20	2.90	2.57	2.57

Tableau 5: Variations du courant en fonction de la tension appliquée pour différentes distances.
e: Benzène

BIBLIOGRAPHIE

[1] F.GUERBAS

"Etude de la génération des bulles gazeuses dans les diélectriques liquides et leur transition au streamer"
thèse de Magister ENP d'Alger Mai 1994.

[2] R.KATTAN

"Etude de la formation et de la dynamique des bulles dans les hydrocarbures liquides générées par les impulsions de courant en champ électrique intense"
Thèse de Doctorat INPG Grenoble 1990

[3] M.HAIDARA

"Impulsions de Trickel dans le cyclohexane pur en champ divergent" Thèse d'Etat INPG Grenoble 1988.

[4] A.DENAT

"Etude de la conduction électrique, dans les solvants non polaires" Thèse d'Etat INPG Grenoble 1982.

[5] R.TOBAZÉON

"Les diélectriques liquides: préclaquage et claquage"
Techniques de l'ingénieur (D 226) Sept. 1986.

[6] HALBERN ET GOMER

"Fields ionisation in liquids"
J.chem.phys, S1, NO 2, (1969) pp. 1031 et 1048

[7] A.DENAT, M.HAIDARA, R.KATTAN, N.BONIFACI

"Phénomènes prédisruptifs dans les hydrocarbures liquides et les gaz comprimés" Journées d'études -SEE- Paris -Nov. 1989.

- [8] WISSMIDT KARIJ
 "Current injection and light emission in liquid Argon and Xenon in a divergent electric field"
 IEEE. Trans. Electr. Ins., EI -19, NO 5, (1984), pp. 389.
- [9] R.COELHO et J. DEBEAU
 "Phénomènes de préclaquage dans les hydrocarbures es" J. Phys. D₄ (1971), pp 1266.
- [10] A.DENAT, J.P. GOSSE et B.GOSSE
 "Conduction du cyclohexane très pur en polarité pointe-plan " Revue de physique appliquée,
 22(1987) pp.1103-1111.
- [11] A.BEROUAL et A.DENAT
 "Analyse spectrale de la lumière émise par les streamers dans les diélectriques liquides"
 C.R. Acad. Sci.Paris, t.306,série II, 1988, pp.187.
- [12] A.BEROUAL
 "phénomènes de propagation et de génération dans les diélectriques liquides en géométrie pointe-plan sous creneau de tension" Thèse de doctorat d'Etat
 pp -Grenoble 1987.
- [13] O.LESAINT
 "phénomènes Prédruptifs en tension alternative dans l'huile de transformateur" journées d'études,grenoble 1986, pp. 93-98.
- [14] K.C.KAO
 "theory of high field electric conduction and breakdown in dielectric liquids" IEEE.
 transactions of electrical insulation, EI. 11,
 1976, pp. 121-128.
- [15] A.DENAT, O.LESAINT et R.TOBAZEON:
 "progrès récents dans la compréhension des mécanismes prédruptifs et disruptifs, dans les diélectriques isolants" Journées d'études SEE.
 Paris Nov. 1989.

- [16] Z. KRAZUCKI
"breakdown of liquids dielectrics" Proc. Roy. Soc.,
Volume A 294, 1966, pp. 393-404.
- [17] W. R.L. THOMAS
"The influence of molecular structure on the
dielectric strenght of insulating" Proc. of the
Conf. on Diel. Mat. Meas. and Appl., Conf. Pub.,
No 129, 1975, pp. 313-314.
- [18] S. BOUAZABIA
"Contribution à l'étude de la génération des
bulles gazeuses sous tension continue"
Thèse de Magister ENP d'Alger Mai 1991
- [19] S.T. RZAD, J.C. DEVINS et R.J. SCHWABE
"Prebreakdown phenomena in liquids" IEEE. Trans.
on electr. ins, EI 14, 6(1979), pp. 289.
- [20] A. BEROUAL et R. TOBAZÉON
"prebreakdown phenomena in liquid dielectric"
IEEE. Trans. Electr. Ins. EI -21 NO 4, 1986,
pp. 613-627.
- [21] A. BEROUAL
"Relation entre courant, charge et vitesse de
propagation des streamers dans les diélectriques
liquides" à paraître
- [22] P.B. Mc GRATH et P.J. Mc KENNY
"Comparative optical observations of a
prebreakdown events in n-hexane" Journal of
electrostatic, 12 (1982), pp. 241-246.
- [23] H. YAMASHITA et H. AMANO
"Prebreakdown current and light emission in
transformer oil"
IEEE Trans. Elect. Ins., EI -20,2, (1985), pp.
247.

- [24] A. BEROUAL et R. TOBAZEON
"Propagation et génération des streamers dans les diélectriques liquides" Revue de phys. appli. 22 (1987), pp. 1117-1123.
- [25] O. LESAIN, M. LOZACHEUR et R. TOBAZEON
"Phénomènes prédisruptifs et claquage, dans l'huile minérale sous tension alternative"
Journées d'études SEE Paris Nov. 1989.
- [26] W.G. CHADBAND
"On variation in the propagation of positive discharges between transformer oil and silicone fluids"
J. phys. D. Appl. Phys, 13 (1990), pp. 1299.
- [27] N. ALLAN et E.M. HIZZAL
"prebreakdown phenomena in transformer oil subjected to nonuniform fields" Proc. IEEE, vol. 121,3, (1974), pp. 227.
- [28] J.C. DEVINS, S.J. RZAD and R.J. SCHWABE
"Breakdown and prebreakdown phenomena liquids"
J. Appl. phys. 52(7)/, July 1981
- [29] R. TOBAZEON
"Claquage dans les liquides, situation actuelle"
Journées d'études, Grenoble 1986, pp. 77-78.
- [30] A. BEROUAL et R. TOBAZEON
"Propagation et génération des streamers dans les liquides diélectriques"
Journées d'études, Grenoble 1986, pp. 99-104
- [31] F. HEIMAN, P. SIBILLOT et R. CORLHO
"New observations of prebreakdown events in n-hexane in a point-plan configuration"
J. Phys. D. appl. phys. Vol 9, 1976, pp. 95

- [32] A. BEROUAL, C. MARTEAU et R. TOBAZÉON
"measurement of the charge of a single or series
of streamers in liquids subjected to a voltage
step"
IEEE Trans. Elect. Ins. Vol. 23 No 3, June 1988,
pp. 427.
- [33] A. BEROUAL et R. TOBAZÉON
"Effects of hydrostatic pressure of the
prebreakdown phenomena in dielectric liquids"
IEEE. Ann. Conf. Insul. Dielectr. phenom.
NAS NRC Buffalo, USA, 1985.
- [34] A. BEROUAL et R. TOBAZÉON
"Propagation des streamers dans les diélectriques
liquides"
C.R. Acad. Sc. Paris t, 303 série II, NO 4, 1986
pp. 279-284.
- [35] H. MOULAI
"Contribution à l'étude des phénomènes de
streamers dans les diélectriques liquides en
géométrie pointe-plan sous choc de foudre"
Thèse de Magister, ENP d'Alger Juin 1990.
- [36] P. J. VUARCHEX
"Claquage au choc de foudre des huiles pour
transformateurs" Journées d'études, Grenoble
1986, pp. 105-111
- [37] P. SIBILLOT et R. COELHO
"Phénomènes dans l'azote liquide aux champs
très intenses" Journées d'études, Grenoble
1986, pp. 76-77.
- [38] K. YOSHINO
"Electrical conduction and dielectric breakdown
in liquids dielectrics" IEEE, Trans. on
elect. ins., Vol EI-21 No 6 Dec. 1986, pp. 387.

- [39] A.DENAT, B.GOSSE and J.P.GOSSE
"High field D.C. and A.C. conductivity of electrolyte solutions in hydrocarbons "
Journal of Electrostatics, 11 (1982),
pp.179-194.
- [40] A.DENAT, B. GOSSE and J.P.GOSSE
"Electrical conductions of solutions of an ionic surfactant in hydrocarbons" Journal of electrostatics, 12(1982), pp.197-205.
- [41] P.K.WATSON
"Electrostatic and hydrodynamic effects in the electrical breakdown of liquid dielectrics"
Proc.of the 8th Inter.
Conf.on cond.and breakdown diel.liquids,
Jul.1984,pp.361-365.
- [42] N.FELICI
"liquides et gaz : les mécanismes de claquage sont-ils comparables ?" Journées d'études,
Grenoble 1986, pp.88-92.
- [43] J.CASANOVAS, A.CHEMINS, J.P.GUELFUCCI, R.GROB et J.P.GIRINE
"Mesure des mobilités ioniques dans les huiles silicones du type polyd.méthyl siloxane de différentes viscosités"
Journées d'études, Grenoble 1986, pp.9-13.
- [44] P.ATTEN AND T.HONDA
"The electroviscous effet and its explanation the electrodynamic origin; study under unipolaire D.C. injection"
Journal of electrostatic,11 (1982),pp.225-245.
- [45] A.BEROUAL
"Initiation of streamers in dielectric liquids with pointe-plan electrodos under step-voltage"
à paraître.

[46] A. BEROUAL et R. TOBAZEON

"Les effets de la pression hydrostatique sur
les phénomènes de préclaquage dans les
diélectriques liquides" C.R.Acad.Sc
Paris,t303, Série II, No 12, 1986, pp.1081-1084

[47] A. BEROUAL and R. TOBAZEON

"Streamer initiation in liquid and solid
cyclohexane with point-plan electrodes
subjected to voltage steps"
Journal of physics D: applied physics,
22(1986), pp.1568.