

15/91

République Algérienne Démocratique et Populaire

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Electrique

Thèse de MAGISTER

Présentée par

Zahir DJEMAI

\*\*\*\*\*SUJET\*\*\*\*\*

Etude de la propagation des streamers à l'interface  
liquide- solide sous tension alternative 50 Hz

\*\*\*\*\*

Soutenue le 29-6-91 devant la commission d'examen :

- |           |               |            |                      |     |
|-----------|---------------|------------|----------------------|-----|
| <b>MM</b> | M.E ZAIM      | Président  | Maitre de Conférence | ENP |
|           | A. BEROUAL    | Rapporteur | Professeur           | ENP |
|           | A. BOUBAKEUR  | Examineur  | Chargé de cours      | ENP |
|           | A. BENSENOUCI | Examineur  | Maitre de conférence | ENP |
|           | M. MOUDJAHED  | Examineur  | Chargé de cours      | ENP |

*A ta mémoire HAMID*

*A ma chère famille*

*A tous ceux qui, de grec ou de latin nourris,  
de faim ont péri.*

# S O M M A I R E

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

## CHAPITRE I

### I RAPPELS

1.1 CONDUCTION DANS LES LIQUIDES DIELECTRIQUES EN CHAMPS ELEVES .....	5
1.2 PHENOMENES D'INTERFACES .....	10
1.2.1 Mise en évidence d'un effet d'interface .....	11
1.2.2 Couche diffuse et conductivité superficielle ....	13
1.2.3 Conduction dans une isolation mixte liquide-solide .....	17
1.2.4 Pertes diélectriques .....	22
1.3 PHENOMENES DE POLARISATION .....	26
1.4 DECHARGES A L'INTERFACE LIQUIDE-SOLIDE ISOLANTS ; PHENOMENES DE STREAMERS .....	31
1.4.1 Disposition parallèle des isolants .....	32
1.4.2 Disposition des isolants perpendiculairement au champ .....	36
1.5 FACTEURS AFFECTANT LA PROPAGATION DES STREAMERS SUR L'INTERFACE LIQUIDE-SOLIDE .....	40
1.5.1 Effet des traitements de surface sur la conduction des systèmes mixtes huile/polymère.....	41
1.5.2 Effet des décharges partielles sur le système d'isolation mixte polyéthylène / huile .....	46
1.6 MODELE DE PROPAGATION DES STREAMERS SUPERFICIELS..	49

# S O M M A I R E

INTRODUCTION GENERALE ..... 1

## CHAPITRE I

### I RAPPELS

1.1	CONDUCTION DANS LES LIQUIDES DIELECTRIQUES EN CHAMPS ELEVES .....	5
1.2	PHENOMENES D'INTERFACES .....	10
1.2.1	Mise en évidence d'un effet d'interface .....	11
1.2.2	Couche diffuse et conductivité superficielle ....	13
1.2.3	Conduction dans une isolation mixte liquide-solide .....	17
1.2.4	Pertes diélectriques .....	22
1.3	PHENOMENES DE POLARISATION .....	26
1.4	DECHARGES A L'INTERFACE LIQUIDE-SOLIDE ISOLANTS ; PHENOMENES DE STREAMERS .....	31
1.4.1	Disposition parallèle des isolants .....	32
1.4.2	Disposition des isolants perpendiculairement au champ .....	36
1.5	FACTEURS AFFECTANT LA PROPAGATION DES STREAMERS SUR L'INTERFACE LIQUIDE-SOLIDE .....	40
1.5.1	Effet des traitements de surface sur la conduction des systèmes mixtes huile/polymère.....	41
1.5.2	Effet des décharges partielles sur le système d'isolation mixte polyéthylène / huile .....	46
1.6	MODELE DE PROPAGATION DES STREAMERS SUPERFICIELS..	49

CHAPITRE II

II *TECHNIQUE EXPERIMENTALE*

2.1	<i>DISPOSITIF EXPERIMENTAL</i>	54
2.2	<i>ECHANTILLONS ETUDIES</i>	59
2.2.1	<i>Le P.V.C</i>	60
2.2.2	<i>L' E.P.D.M</i>	63
2.3	<i>TECHNIQUE DE MESURE</i>	65

CHAPITRE III

III *PHENOMENES DE PROPAGATION DES STREAMERS*

3.1	<i>CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DES ECHANTILLONS</i>	72
3.2	<i>PROPAGATION DES STREAMERS</i>	77
3.2.1	<i>Influence de la durée d'application de la tension</i>	78
3.2.2	<i>Influence de la tension et du système d'électrodes</i>	81
3.2.3	<i>Influence de l'épaisseur de l'échantillon polymère</i>	84
3.2.4	<i>Influence de la structure du liquide</i>	87
3.2.5	<i>Influence du rayon de courbure de l'électrode pointe</i>	87

<i>CONCLUSION</i>	91
<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	

## R E M E R C I E M E N T

Ce travail a été effectué sous la direction de M<sup>r</sup> Abderrahmane BEROUAL, Professeur à l'ENP. Qu'il me soit permis de le remercier profondément pour m'avoir aidé à mener ce travail à terme.

Je remercie vivement M<sup>r</sup> M.K ZAIM, Maître de conférence à l'ENP, de me faire l'honneur de présider le jury.

Mes remerciements s'adressent également à M<sup>r</sup> A. HENSENOUCI, Ph.D à l'ENP, M<sup>r</sup> M. MOUJAHED, Charge de cours à l'ENP, pour avoir accepté de faire partie du jury.

Je tiens à remercier plus particulièrement M<sup>r</sup> A. BOUBAKKUR, Docteur es Sciences Techniques à l'ENP, de sa présence à mon jury, et surtout pour ses conseils instructifs.

Que M<sup>r</sup> A. MEKHALDI, Maître assistant à l'ENP, trouve ici l'expression de mes chaleureux remerciements pour avoir examiné mon travail et répondu à mon invitation.

Les essais ont été effectués au Laboratoire de contrôle technique de l'ENICAB, que le personnel de ce laboratoire, particulièrement son responsable M<sup>r</sup> R. KHALIL et le technicien Hamid soient rassurés de mes vifs remerciements.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, je présente ma reconnaissance et ma profonde sympathie.

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Les isolants solides utilisés dans la construction de matériels haute tension (Transformateurs, condensateurs, câbles) sont généralement associés à des liquides diélectriques afin d'éliminer les inclusions gazeuses dont la présence entraîne l'apparition des décharges partielles .

Dans la pratique industrielle [1], qu'il s'agisse d'un gaz, d'un liquide et même du vide, l'interface solide/fluide constitue un point faible de l'isolation, le claquage est alors facilité à partir de cette interface. Le point triple où trois matériaux (métal des électrodes, isolant solide, fluide) sont en présence, a été reconnu comme étant l'endroit critique où se déclenche le claquage.

En l'absence de surtension qui peut causer un claquage immédiat, le problème des isolations mixtes liquide-solide est la détérioration graduelle qui résulte des pertes diélectriques dans l'isolation. En présence du champ électrique, différents types de détérioration sont présents simultanément et leur importance dépend de la nature du solide et du liquide, de la forme de la tension appliquée (AC, DC, Impulsion), de la température de service et de l'homogénéité du diélectrique.

Trois principaux types de détérioration sont connus pour être responsables du claquage d'une isolation liquide-solide [26] :

- a- Détérioration due aux décharges internes .
- b- Détérioration électrochimique .
- c- Détérioration due aux décharges superficielles .

Actuellement le papier imprégné laisse place de plus en plus aux polymères dans la construction d'appareillage électrique (transformateurs, condensateurs de puissance, câbles).

Bien que les nouveaux polymères aient de très grands avantages par rapport au papier, leur utilisation présente elle aussi certains inconvénients .

Cette isolation polymère/liquide fait apparaître deux problèmes spécifiques : l'un lié au volume, l'autre à l'interface. De ce fait, deux types de décharges peuvent prendre naissance :

les unes appelées " arborescences " se développent en volume, les autres " streamers " se propagent sur l'interface solide-liquide; c'est ce deuxième type qui fait l'objet de notre étude .

Notre travail concerne donc l'étude de la propagation des streamers à l'interface liquide-solide pour différentes configurations d'électrodes sous tension alternative .

Dans un premier chapitre, nous présenterons des résultats de travaux d'investigation de nombreux chercheurs sur les phénomènes de conduction en volume dans les diélectriques liquides et à

*l'interface solide-liquide ainsi que les pertes diélectriques associées .*

*Nous exposerons également les résultats relatifs à la propagation des streamers sur l'interface solide-liquide .*

*Nous présenterons dans le deuxième chapitre les techniques expérimentales ainsi que les caractéristiques des échantillons utilisés .*

*Le troisième chapitre traitera des résultats expérimentaux obtenus en laboratoire concernant la propagation des streamers sur le polychlorure de vinyle ( PVC ) et l'Éthylène -Propylène-Diène Modifié ( EPDM ) immergés dans une huile isolante .*

*L'influence de divers paramètres tels l'épaisseur des échantillons, la géométrie des électrodes ainsi que la structure du liquide sur la propagation des streamers sera également considérée .*

*De même, nous discuterons ces résultats à la lumière de ceux obtenus par d'autres chercheurs .*

\*\*\*\*\*

C H A P T E R I

\*\*\*\*\*

Dans ce chapitre, nous exposons différents résultats de travaux de recherche rapportés dans la littérature concernant les phénomènes de conduction en volume et en surface dans les matériaux utilisés dans les isolations mixtes. Nous présentons également en les résumant, les résultats d'autres chercheurs sur la propagation des streamers à l'interface solide-liquide .

## I- RAPPELS

### 1.1 CONDUCTION DANS LES DIELECTRIQUES LIQUIDES EN CHAMPS ELEVES

Dans la pratique, la caractéristique la plus importante de la conduction dans les liquides est la grande dépendance du courant de la tension dès que le champ électrique excède 50 kV/cm [ 2 ] .

Dans le domaine des intensités de champ facilement atteint en laboratoire et rencontré dans les applications industrielles (50 à 1000 kV/cm ), la résistance  $V/I$  chute souvent de plusieurs ordres de grandeur . Felici a proposé une interprétation de la caractéristique tension/courant déduite de la cinétique des réactions électrochimiques à l'interface métal/liquide. On trouve ainsi une relation générale entre la tension  $U$  et le courant  $i$  qui s'écrit sous la forme réduite [ 3 ]:

$$y = \frac{x \cdot \exp(ax)}{x + \exp(-ax)}$$

où  $x=E/E_s$  ,  $y=i/i_s$  et  $a=\eta E_s d/2U$

avec  $i_s$ : courant de saturation qui serait observé sous champ intense, si la cinétique des réactions d'électrodes ne dépendait pas du champ électrique.

$E_s$ : est le champ électrique pour lequel  $i=i_s/2$ .

$d$ : l'épaisseur de la couche double compacte.

$\eta=\epsilon/\epsilon_0$  rapport de la permittivité du liquide en masse à sa permittivité dans la couche double.

Dans le cas des liquides à constante diélectrique élevée ( exemple Nitrobenzène  $\epsilon/\epsilon_0=36$  ), l'expression précédente donne souvent une bonne représentation des résultats expérimentaux sous tension continue [3]. On retrouve en particulier la courbe de Nikuradsé avec ses trois segments : ohmique, saturation et croissance exponentielle [4]. Cependant les paramètres numériques obtenus par la relation précédente conduisent généralement à des valeurs invraisemblables de  $a$ ; celles-ci étant trop grandes [3]: 10 à 100 fois plus élevées que prévu. Pour expliquer les mécanismes de la conduction aux champs élevés, d'autres interprétations ont été avancées [2 , 3] :

- 1- Ionisation par choc et formation d'avalanches.
- 2- Accroissement de la mobilité ionique par le renforcement du champ électrique.
- 3- Accroissement de la dissociation des électrolytes en présence du champ électrique.
- 4- Emission électronique à la cathode.
- 5- Oxydation ou réduction des espèces neutres à la surface des électrodes.

On remarque que les trois premières sont des mécanismes liés au volume alors que les deux dernières sont de nature interfaciale. De ce fait, nous donnerons une interprétation succincte des deux premiers mécanismes.

L'ionisation par choc a été bien admise durant 1930 à 1950, en raison de sa présentation cohérente dans l'ouvrage de Nikurdsé [4]. Cependant, ce type d'ionisation ne peut exister que pour des intensités de champ supérieures au MV/cm : les liquides étant plus désordonnés que les polymères organiques [2], les électrons y seront plus dispersés et n'atteindront pas l'énergie d'ionisation pour des intensités de champ inférieures au MV/cm [4]. La mesure (très difficile) du coefficient d'ionisation, similaire à celui de Townsend dans les gaz [3], montre que ce type de mécanisme est pratiquement inexistant dans les liquides organiques en dessous de 0,5 MV/cm.

L'hypothèse de l'accroissement de la mobilité ionique par le champ électrique a été parfois envisagée. Cependant, les électrons libres sont manifestement absents dans les liquides organiques sauf dans quelques composés (quelques hydrocarbures) sous des conditions exceptionnelles [2]; Ceci est dû à la grande élévation de l'entropie quand l'électron est piégé et donne naissance à un ion négatif. Cette hypothèse n'est plausible que pour des champs supérieurs à 0,5 MV/cm [3].

En ce qui concerne la troisième hypothèse, à la différence des deux précédentes, la dissociation des électrolytes [4, 5] (dont la théorie approfondie est due à Onsager) joue un rôle important et donne l'explication la plus convenable. Cependant, elle n'est

valable que pour les liquides dont la constante diélectrique est faible (les hydrocarbures). Pour les liquides polaires, la dissociation due au renforcement du champ selon Onsager, a une contribution infime dans la conduction [2].

L'émission d'électrons à la cathode a été proposée par un grand nombre de chercheurs. Son existence ne fait plus de doute : il y a toujours transfert d'électrons entre deux phases adjacentes. Pour une cathode immergée dans une huile organique, la barrière à travers laquelle les électrons doivent passer sera faible pour deux raisons :

a- La matière condensée présente souvent une bande d'électrons libres ou, au moins de nombreux niveaux capteurs dont l'énergie est bien au dessous de celle de l'électron dans le vide. Un autre argument est que l'électron libre polarisera la matière environnante qui verra son énergie diminuer d'un facteur de 2 à 3.

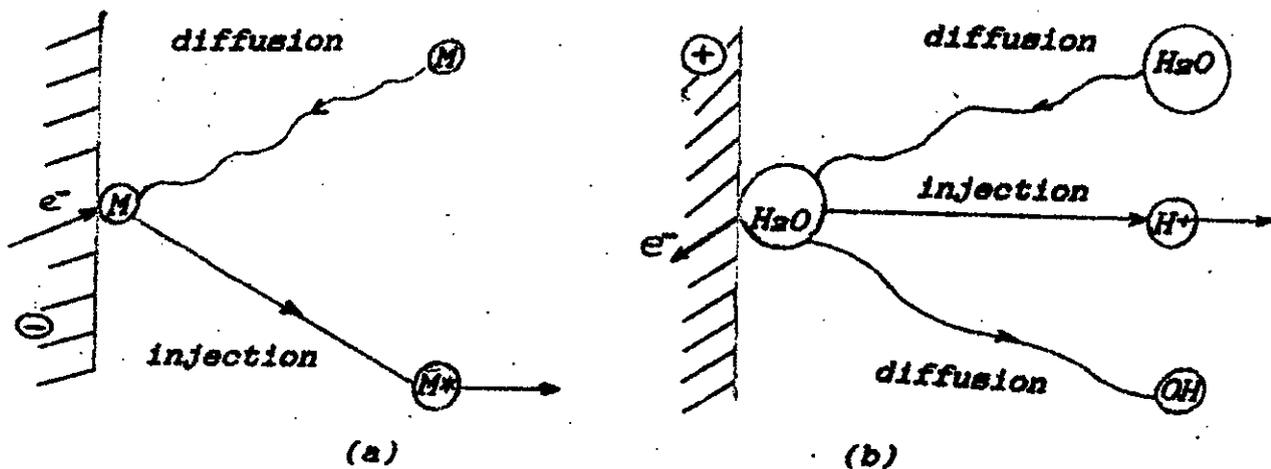
b- Les ions positifs dus aux traces d'électrolytes se rassembleront à l'interface jusqu'à ce que la chute de tension dans la double couche ainsi formée atteigne 1 à 2 V [2]. Au delà de cette double couche dont l'épaisseur est d'environ  $5 \cdot 10^{-8}$  cm [2, 6], le liquide est neutre et la répartition des charges est régie par des lois purement électrostatiques [6].

Pour ce qui est du dernier processus qui est purement électrochimique, l'oxydation ou la réduction des espèces neutres à l'interface liquide/métal sont des phénomènes omniprésents. Ce processus diffère de celui de l'émission électronique de la cathode sur plusieurs points :

\* Il génère des porteurs de charges aussi bien négatifs que positifs,

\* Le transfert de l'électron se produit entre le métal et les espèces adsorbées (figure 1.1). Pourvu que les niveaux accepteurs et donneurs d'énergies soient disponibles, le transfert d'électrons est un processus rapide .

\* Quand le champ appliqué est assez intense de façon à abaisser la barrière de potentiel par plus de  $U=0,025$  V pour un ion, la montée raide du courant survient [2]; la loi  $J(E)$  dépend alors de la barrière de potentiel .



**Figure 1.1 Réactions électrochimiques typiques :**  
 a) Réduction des espèces moléculaires M à un ion radical négatif (ex: Nitrobenzène)  
 b) Oxydation de l'eau à un proton et à un radical hydroxyl.

En définitive, la cause principale de la conduction au champ élevé est l'injection des porteurs de charges aux électrodes. La dissociation selon ONSAGER joue un rôle très limité dans les hydrocarbures en présence de certains solutés. Dans les autres cas, on a plus affaire aux réactions électrochimiques.

Aux champs très élevés cependant, l'émission électronique à la cathode devient le processus le plus dominant, mais les électrons libres seront difficiles à observer, sauf dans des conditions exceptionnelles. La conduction en champ élevé est le problème le plus important dans l'industrie dès qu'on essaye d'aller au delà de 50 kV/cm; si elle est en grande partie générée dans le volume du liquide, sa suppression serait impossible [2].

Heureusement que le phénomène d'interfaces peut être prévenu en améliorant l'état de l'interface [2, 7]. Un moyen bien connu, serait de couvrir l'électrode métallique d'une membrane semi-perméable qui permette aux ions déviés vers l'électrode de passer à travers, sans délivrer d'électrons aux espèces neutres évitant ainsi l'oxydo-réduction [2, 6]. L'inconvénient c'est que les membranes sont sujettes à des déformations mécaniques dues aux forces électrostatiques. L'autre possibilité consiste à utiliser des couches fines semi-conductrices [2].

Dans tous les cas, il est plus utile d'éliminer au préalable les traces d'électrolytes; bien qu'elles ne contribuent que très peu à la conduction, elles fournissent des ions qui forment la double couche, laquelle couche joue un rôle essentiel dans l'injection des porteurs de charges.

## 1.2 PHENOMENES D'INTERFACES

Il est toujours nécessaire, pour maintenir à distance des pièces sous tension, d'utiliser un solide isolant. Dans le cas où

ces pièces se trouvent immergées dans un liquide diélectrique, on se trouve confronté au problème d'interface liquide-solide.

### 1.2.1 Mise en évidence d'un effet d'interface

En général, les pertes diélectriques ( $\text{tg}\delta$ ) mesurées sur les échantillons imprégnés sont supérieures à celles des composants seuls (solide non-imprégné et liquide) [6, 8], comme indiqué sur la figure (1.2), alors que  $\text{tg}\delta$  devrait être compris entre  $\text{tg}\delta_s$  (pertes diélectriques du solide) et  $\text{tg}\delta_l$  (pertes du liquide), nous pourrions donc affirmer qu'il existe des pertes supplémentaires dues à l'interaction entre les deux milieux hétérogènes.

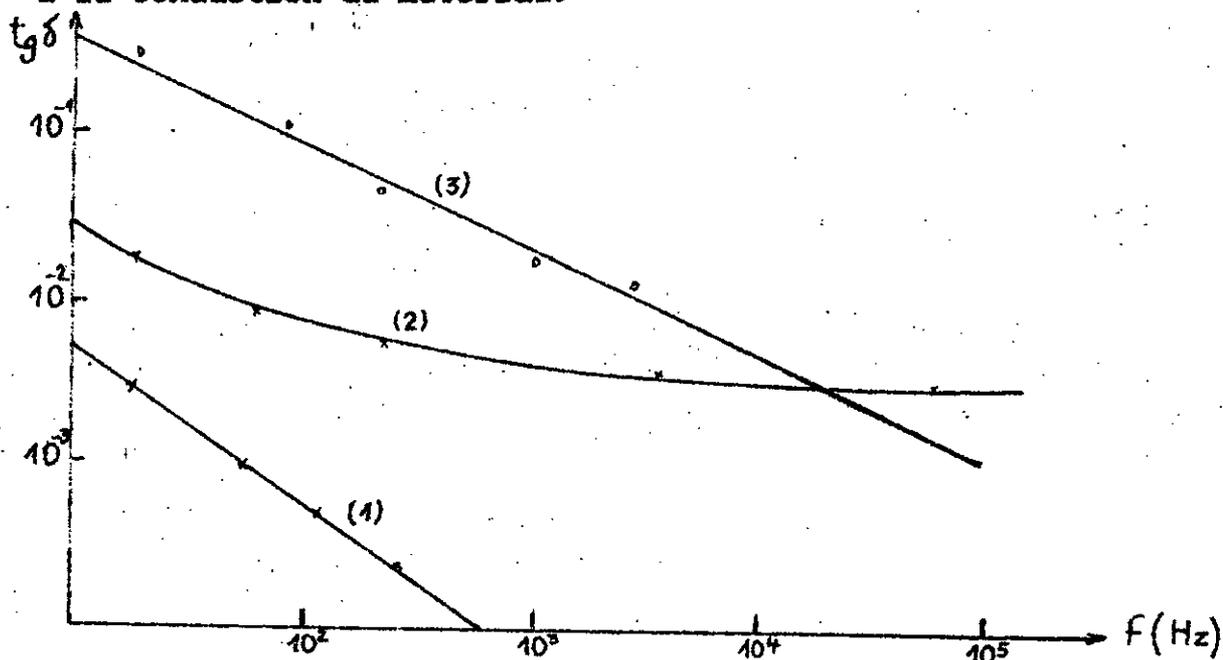
D'autre part, l'étude des courants transitoires montre que le pic (du courant) caractéristique de l'injection dans le liquide libre (temps de transit) disparaît, et le courant observé est décroissant de façon monotone dans le temps (figure 1.3) .

On pourra alors conclure qu'un courant de conduction important résulte de la présence des interfaces liquide-solide, et qu'il masque l'injection.

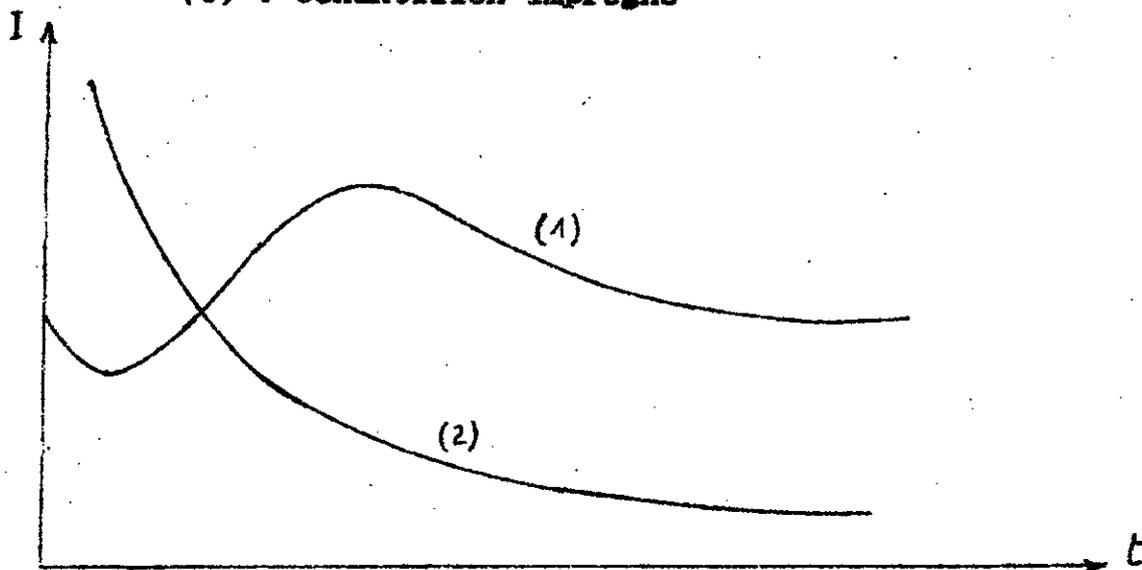
Nous avons lié ces pertes et cette conduction supplémentaire à la double couche électrique aux interfaces liquide-solide.

La présence de la double couche a été vérifiée par les essais sur l'électroosmose, phénomène électrocinétique induit par la double couche, produisant ainsi un déplacement du liquide dans un milieu poreux sous l'effet d'un champ électrique continu [6, 9].

Par conséquent, les charges de la couche diffuse participent donc à la conduction du matériau.



**Figure 1.2 : Variation des pertes en fonction de la fréquence**  
 (1) : CH saturé de TIAP (Picrate de Tri-Iso-Aminolammonium)  
 (2) : échantillon non-imprégné de verre fritté  
 (3) : échantillon imprégné



**Figure 1.3 : Courant transitoire en fonction du temps**

- (1) : forme typique des courants transitoires d'injection unipolaire
- (2) : forme typique des courants transitoires dans le verre fritté

### 1.2.2 Couche diffuse et conductivité superficielle

En mettant deux phases quelconques en contact, elles développent une différence de potentiel à l'interface; en particulier, lorsqu'il s'agit de deux surfaces hétérogènes (fluide-solide).

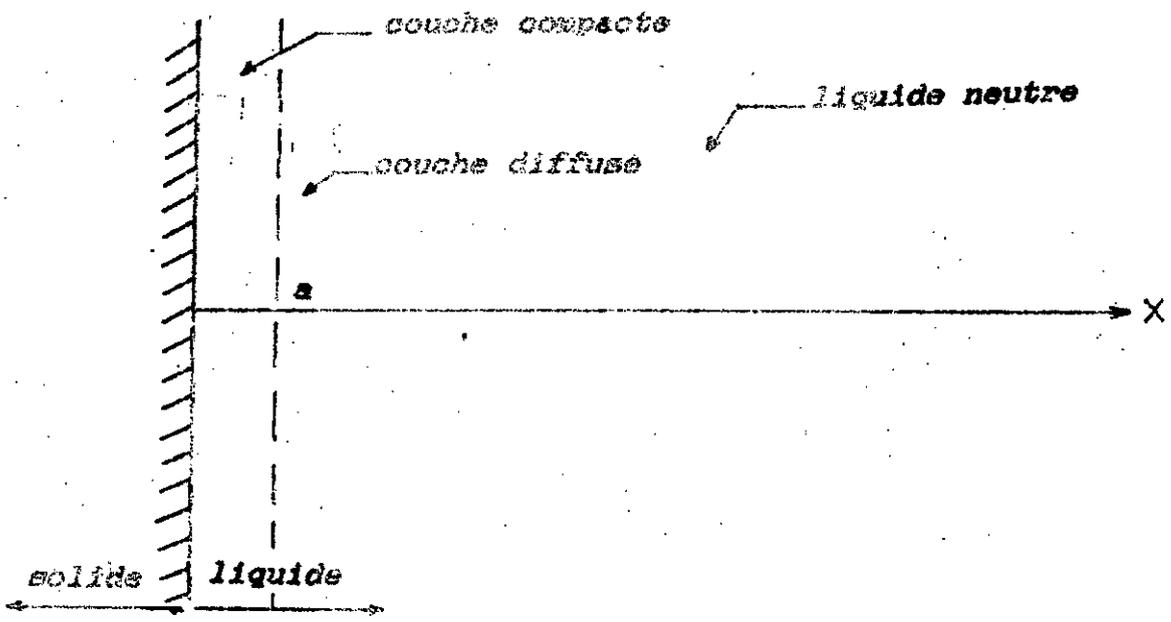
Ainsi, la surface du solide acquiert une charge électrique d'un signe, celle du fluide acquiert une charge de signe opposé en vertu du principe de l'électroneutralité. D'où le nom de la double couche électrique.

Plusieurs modèles décrivant la répartition des charges dans la double couche ont été avancés, entre autres celui de Gouy-Chapman [6]. Dans ce modèle, on considère que la densité de charge de la surface solide est  $\sigma_0$ . La charge dans le liquide est répartie dans deux couches (figure 1.4) :

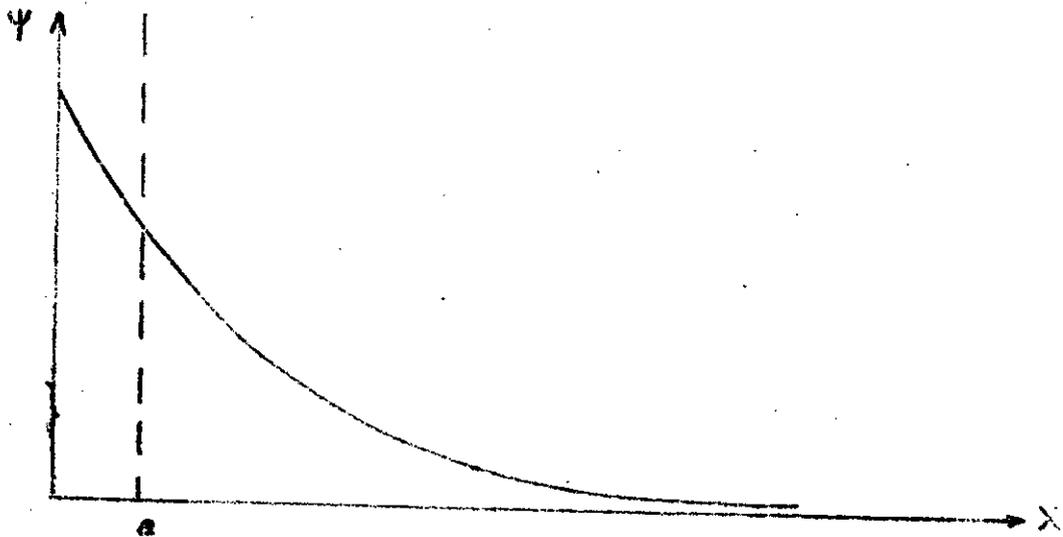
La couche compacte d'épaisseur "a" de l'ordre du rayon ionique (3 à 10 Å) qui est une zone d'adsorption spécifique, les ions sont pratiquement adhérents à la paroi. Au delà de "a" (couche diffuse) la répartition des charges est régie par les lois électrostatiques.

En un point x de la couche diffuse normal à la surface, le potentiel  $\psi(x)$  obéit aux équations de Poisson-Maxwell-Boltzmann.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}$$



(a)



(b)

**Figure 1.4** a) Schéma de la structure de la double couche  
 b) Distribution du potentiel dans le liquide

$\rho$  : densité volumique de charge au point d'abscisse  $x$  .

$\epsilon$  : constante diélectrique du liquide

$$\rho = \sum_i Z_i e \cdot n_i$$

$e$  : charge élémentaire

$Z_i$  : valence de l'ion  $i$  ( affecté d'un signe )

$n_i$  : concentration en ion de type  $i$

$n_i$  obéit à l'équation de Maxwell-Boltzmann

$$n_i = n_{oi} \exp\left(\frac{-Z_i e \psi}{kT}\right)$$

$n_{oi}$  : concentration loin de l'interface

$k$  : constante de Boltzmann

$T$  : température .

Pour un électrolyte monovalent  $Z_i = \pm 1$

$$\rho = n_o e \left[ \exp\left(\frac{-e\psi}{kT}\right) - \exp\left(\frac{e\psi}{kT}\right) \right]$$

d'où

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{-n_o e}{\epsilon} \left[ \exp\left(\frac{-e\psi}{kT}\right) - \exp\left(\frac{e\psi}{kT}\right) \right]$$

L'intégration de cette équation, compte tenu des conditions aux

limites :  $\lim_{x \rightarrow \infty} \psi(x) = 0$  et  $\lim_{x \rightarrow \infty} d\psi/dx = 0$

montre que  $\psi$  décroît exponentiellement à partir de  $\psi(a)$  avec une longueur caractéristique  $L_D$  (longueur de Debye) :

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon kT}{2n_o e^2}}$$

L'étendue de la couche diffuse caractérisée par la longueur de Debye  $L_D$  à température ambiante est :

$$L_D = 4,7 \cdot 10^{-7} \sqrt{\rho \epsilon_r K}$$

où  $\rho$  est la résistivité,  $\epsilon_r$  est la constante diélectrique

$K$  la mobilité des ions dans le liquide .

À titre d'exemple, dans le Cyclohexane ( $\epsilon_r \approx 2$ ) avec  $\rho = 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$

$$\text{et } K = 6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$$

l'épaisseur de la couche diffuse est de l'ordre de  $L_D = 5 \mu\text{m}$ .

En assimilant la couche diffuse à une surface chargée, sa densité de charge superficielle est donnée par :

$$\sigma = \int_a^\infty \rho dx = \int_a^\infty -\epsilon \frac{d^2\psi}{dx^2} dx = -\int_{\psi(a)}^0 \epsilon d\left(\frac{d\psi}{dx}\right)$$

d'où :

$$\sigma = +2\sqrt{2N_0\epsilon RT} \sinh\left(\frac{e\psi(a)}{2kT}\right)$$

Ainsi  $\sigma$  dépend des caractéristiques du liquide et du potentiel  $\psi(a)$ .

Ce potentiel est très proche du potentiel électrocinétique  $\zeta$  qui est le potentiel du plan de cisaillement entre la surface solide et le liquide [6].

$\zeta$  est obtenu à partir des mesures électrocinétiques. Cependant les valeurs de  $\zeta$  déterminées en électrochimie sont généralement inférieures ou égales à 100 mV .

Par analogie avec la conductivité volumique  $\Gamma_v = K\rho$  (où  $K$  est la mobilité ionique et  $\rho$  la densité volumique de charge ), on peut

définir la conductivité superficielle par :

$$\Gamma_s = K_s - 2N_0 \sqrt{2n_0 e k T} \sinh\left(\frac{e\psi(a)}{2kT}\right)$$

A partir de  $\Gamma_s$ , on pourra alors déterminer le courant et l'angle de pertes associés à l'interface liquide-solide .

### 1.2.3 Conduction dans une isolation mixte liquide-solide

Durant longtemps on a expliqué le comportement de l'isolation imprégnée d'après la théorie de GARTON appelée aussi l'effet Garton [ 10 ].

Selon C.G.Garton, les ions des liquides, arrivés à la paroi solide sous l'effet de l'attraction du champ électrique, seraient stoppés à l'interface sans y adhérer ni pénétrer dans le matériau solide; ils retourneraient dans le liquide libre lors de l'inversion du champ électrique [6, 10, 11]. Cette hypothèse a été vérifiée pour ce qui concerne l'interface du papier imprégné et donne une description quantitative de la dépendance des pertes de la tension  $V$ , de la pulsation  $\omega$  et de la température  $\theta$  .

Mathématiquement, l'effet Garton est fondamentalement non-linéaire. Le courant ionique dans le liquide n'est pas proportionnel au champ instantané mais apparaît dans de brefs intervalles lors de l'inversion du champ électrique, et devient négligeable pendant le reste de l'alternance .

Il est utile de rappeler la théorie linéaire ( Maxwell-Wagner ) concernant la dépendance de  $\text{tg}\delta$  de  $V$ ,  $\omega$  et  $\theta$  pour la comparer à

celle de Garton :

Pour un système mixte papier-liquide où un composant (papier) est un bon isolant, alors que l'autre a une certaine conductivité ionique, les calculs classiques montrent que [ 11,12 ]:

\*  $\text{tg}\delta$  ne dépend pas de  $V$

\* pour  $\epsilon$  variable,  $\text{tg}\delta$  diminue avec l'augmentation de  $\epsilon$

\*  $\text{tg}\delta$  croît avec la température (la résistivité du liquide décroît)

Les prédictions de Garton sont remarquablement différentes. En admettant que le nombre total des ions est constant, et les couches de liquide sont suffisamment minces pour que les ions transitent au moins pour une fraction de la période, on trouve que [ 11 ] :

\*  $\text{tg}\delta$  décroît avec  $V$  en  $V^{-3/2}$

\*  $\text{tg}\delta$  croît avec  $\epsilon$  en  $\epsilon^{1/2}$

\*  $\text{tg}\delta$  décroît avec l'augmentation de  $\theta$ , puisqu'elle est

proportionnelle à l'inverse de la racine carrée de la mobilité

$$\text{tg}\delta = k (K)^{-1/2}$$

Toutes ces prédictions ont été vérifiées pour l'huile/papier, du moins qualitativement [ 13 ].

Sachant que la permittivité des solides est en général plus élevée que celle des liquides, il est peu probable cependant que les ions dans l'huile ne puissent adhérer à la paroi de l'isolant. On suggère, d'après les observations faites sous tension continue que les ions pourraient pénétrer dans le papier

et ne peuvent retourner dans le liquide au cas où la tension est inversée .

Le développement rapide des matériaux synthétiques (exemple : Polypropylène) a mené à un réexamen de la théorie de Garton, et des expériences incluant des liquides isolants et une variété de matériaux solides organiques ( PP, PE, Teflon ) et minéraux (céramique) ont été effectuées dans le but d'étudier le comportement des ions sur l'interface. Les principaux résultats sont résumés comme suit :

La théorie de Garton est valable pour tous les ions à l'interface céramique/liquide mais seulement pour une partie des ions au contact papier/huile . Une fraction significative des ions pénètre dans le papier lorsque un champ électrique alternatif ou continu est appliqué, mais ces ions piégés contribuent très faiblement aux pertes, ce qui satisfait cette théorie ( par mesure de  $\tan \delta$  ).

Quand d'autres films organiques ont été essayés , il a été constaté beaucoup de différences. L'effet Garton, bien que détectable au début, disparaît entièrement après quelques secondes sous tension alternative. Les ions ont été absorbés par le matériau solide. L'étude par analyseur de pertes diélectriques est significative; la partie non linéaire des pertes, facilement visible à l'oscilloscope [14] disparaît très rapidement et ne réapparaît plus, aussi longtemps que la tension est appliquée. Par conséquent, le système est devenu linéaire tant que la

tension alternative n'est pas modifiée. Néanmoins, il y'a une grande dépendance de  $tg\delta$  de  $V$ . On pourra conclure que dans les conditions normales, le système se comporte comme étant linéaire, les ions sont partagés par le solide et le liquide à des proportions variables suivant la tension. Pour des tensions élevées, les ions sont presque entièrement absorbés. Le liquide dépourvu pratiquement de tous les ions verrait ses pertes diminuer considérablement alors que les pertes linéaires dans le solide augmentent.

$tg\delta$  effectivement décroît en  $1/\omega$  et croît avec  $\theta$ . C'est le comportement prédit par la théorie linéaire pour une isolation liquide associé à un solide légèrement conducteur.

Pour ce qui est des ions absorbés, quand la tension est interrompue, ils retournent dans le liquide très lentement [14]. Par conséquent, l'application d'une tension alternative n'accélère pas nécessairement l'évolution vers l'équilibre thermodynamique mais crée un état non stable avec une grande énergie libre. Etant absorbés, les ions gardent leurs propriétés et ne semblent pas se recombinaer entre eux.

Les ions sont accompagnés d'une infime quantité de liquide lorsqu'ils se déplacent dans le solide; ceci est dû à la solvation. Quand la quantité du liquide qui pénètre dans le solide est assez grande, elle risque de causer une humidification visible sur le revers du film [14].

Les propriétés structurales du solide sont très importantes; comme déjà mentionné, aucune pénétration n'a lieu avec un matériau dense comme la céramique. Avec les films organiques, la pénétration des ions sous tension alternative est effective mais dépend considérablement de la nature du matériau et de sa cristallinité. L'augmentation de la cristallinité (ex. par étirement) diminue la pénétration. En ce qui concerne le liquide, le phénomène est aussi universel, l'eau n'est pas une exception. L'effet de la fréquence est important mais la pénétration reste présente sous une tension continue [14]. Il est évident que la tension alternative doit avoir plus d'effets puisque les ions des deux signes sont absorbés dans les deux alternances de la tension, ce qui empêche par conséquent la formation de charges d'espace et diminue donc le champ électrique dans le liquide, tel est le cas sous tension continue.

L'explication de ces phénomènes est surtout liée à la structure du matériau à l'échelle de quelques Å. Les ions avec leurs couches de solvation et quelques quantités de liquide sont vraisemblablement attirés par le champ électrique dans des microfissures ou dans les défauts qui sont toujours présents dans les polymères à savoir les zones faibles entre les groupes de chaînes du polymère. En ce qui concerne les pertes dans l'isolation imprégnée, les résultats précédents expliquent pourquoi les condensateurs en polypropylène (PP) se comportent différemment de celles en papier.

Dans le papier, les pertes décroissent avec l'augmentation de la température alors qu'elles augmentent rapidement pour le (PP)

puisqu'elles sont dues au piégeage des ions d'où une très faible conductivité ohmique du matériau. De même les pertes diminuent avec l'augmentation de la fréquence.

Le fait le plus significatif est que les ions du liquide pénètrent facilement dans tous les polymères organiques sous tension alternative, et entraînent avec eux une quantité appréciable de liquide (solvation) qui altère complètement la conduction et modifie de façon défavorable les propriétés de claquage du solide [14]. Par conséquent, les matériaux hautement hydrophobes ont une durée de vie relativement faible sous tension en présence d'humidité.

#### 1.2.4 Pertes diélectriques :

Pour faire une approche quantitative de l'effet d'interface, Saad [6] a repris les expériences sur des échantillons solides massifs munis de canaux transversaux cylindriques. Ainsi la surface totale de la paroi en contact avec le liquide peut être variée. Par cette méthode, on a pu constater que d'une manière générale, les pertes de l'ensemble solide-liquide sont plus importantes comparées à celles des constituants pris séparément (figure 1.5). Le renforcement est d'autant plus grand que la surface en contact avec le liquide (surface latérale) est importante.

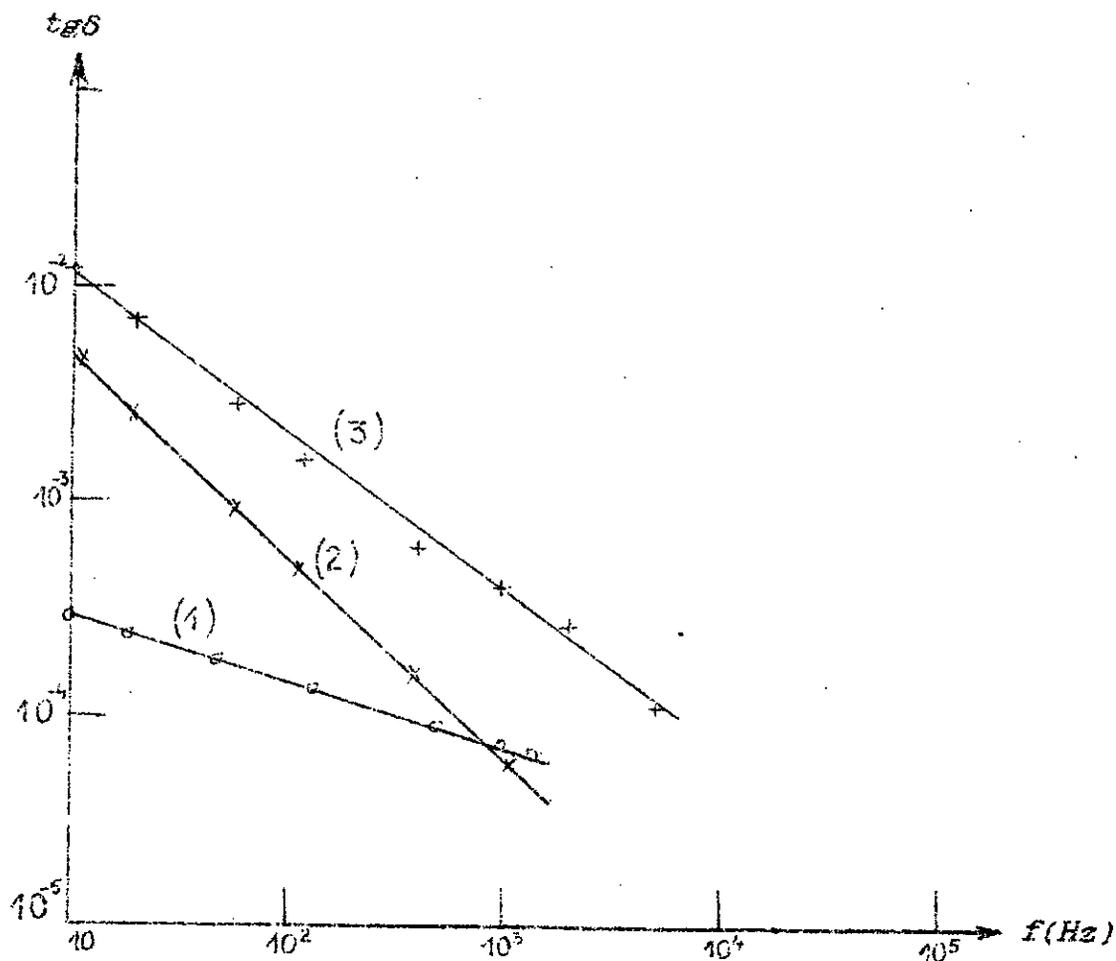
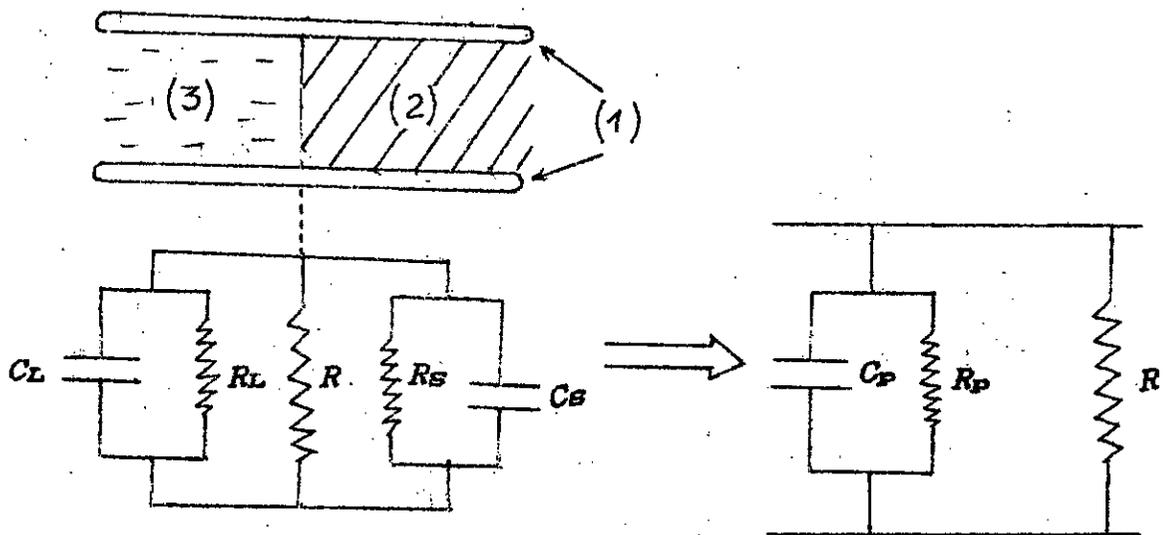


Figure 1.5 : Pertes en fonction de la fréquence d'un échantillon en PTFE / Polytetrafluoro-éthylène / ( $L=3$  mm, 400 pores de diamètre 1,2 mm) imprégné (courbe 3) comparées aux pertes respectives de l'imprégnant Cyclohexane saturé en TAP (courbe 2) et du PTFE seul (courbe 1).

Pour évaluer les pertes ( $tg\delta$ ) du milieu, il a été utilisé le schéma équivalent qui comprend le circuit  $(R_1, C_1)$  équivalent du liquide et  $(R_s, C_s)$  équivalent du solide en parallèle et une résistance  $R$  en parallèle qui représente la conduction superficielle (figure 1.6)



**Figure 1.6 : Interface liquide-solide parallèle à la direction du champ et schémas électriques équivalents**  
 (1) Electrodes  
 (2) Solide S  
 (3) Liquide L

En l'absence de R, le circuit  $(R_p, C_p)$  équivalent est caractérisé par:

$$\text{tg} \delta_p = \frac{\epsilon_s \theta_s \text{tg} \delta_s + \epsilon_l \theta_l \text{tg} \delta_l}{\epsilon_s \theta_s + \epsilon_l \theta_l}$$

et

$$R_p = \frac{1}{2\pi f C_p \text{tg} \delta_p}$$

$\theta_s$  et  $\theta_l$  sont les proportions en volume du solide et du liquide .

$\epsilon_s$  et  $\epsilon_l$  sont les constantes diélectriques du solide et du liquide

f la fréquence.

En présence de R on a :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r C_p}$$

avec

$$\epsilon_0 = \frac{R R_p}{R + R_p}$$



$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_p + \frac{R_p}{R} \operatorname{tg} \delta_p$$

le terme  $\operatorname{tg} \delta_a = (R_p/R) \operatorname{tg} \delta_p$  représente les pertes additionnelles dues à la conductivité superficielle.

La figure (1.7) représente la variation des pertes diélectriques en fonction de la fréquence dans le fluorure de polyvinylidène (PVDF) imprégné de carbonate de propylène (PC) qui est un liquide polaire dont la constante diélectrique est  $\epsilon_r = 65$  [8]. Les valeurs de  $\operatorname{tg} \delta$  du PC pur sont aussi représentées.

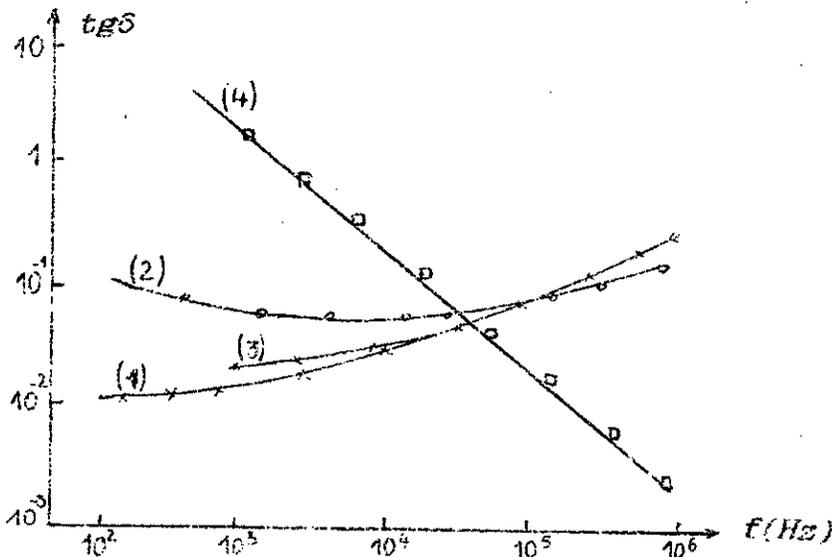


Figure 1.7 : Pertes diélectriques en fonction de la fréquence  
 (1) PVDF seul  
 (2) PVDF/PC  
 (3) PVDF évacué de PC  
 (4) PC seul

En basse fréquence, les pertes  $\text{tg}\delta$  du PVDF imprégné de PC sont 2 à 5 fois supérieures que le PVDF non imprégné. Aux fréquences supérieures à 100 kHz, les valeurs de  $\text{tg}\delta$  du système imprégné deviennent légèrement plus faibles que le PVDF seul. Ceci suggère donc que l'accroissement des pertes est dû à l'interaction entre le PC et le PVDF [8].

### I-3 PHÉNOMÈNES DE POLARISATION :

Nous avons vu précédemment que la mise en contact de deux phases hétérogènes induit inévitablement des pertes diélectriques supplémentaires dues à l'interaction chimique des surfaces de ces deux phases.

De même que, la présence d'un champ électrique aux bornes d'un diélectrique induit des pertes de polarisation. Faraday [15] a introduit le concept de polarisation lorsqu'il a étudié le comportement des isolants dans un champ électrique.

Le phénomène de polarisation est caractérisé par l'apparition d'une mince couche de charges négatives sur une face du matériau et des charges positives sur l'autre face, alors qu'à l'intérieur du diélectrique, il y a compensation de charges [15], ce qui signifie que la polarisation est uniforme dans le matériau.

Dans les conditions normales, les molécules d'un certain nombre de diélectriques ne peuvent être assimilées à des dipôles permanents. Soumis à l'action d'un champ électrique, les centres de charges positives et négatives ne coïncident plus, chaque

atome ou molécule se déforme et peut être assimilé alors à un dipôle dont le moment dipolaire a pour valeur :

$$p = q \Delta l$$

$q$  : charge quelconque

$\Delta l$  : distance entre deux charges.

Pour un volume  $\Delta V$ , et si  $N$  est le nombre d'atomes ou de molécules par unité de volume, on a:

$$\sum p_i = N p \Delta V = P \Delta V$$

$P$  est le moment dipolaire par unité de volume, est appelé aussi polarisation du diélectrique.

Il existe plusieurs mécanismes de polarisation des diélectriques dont les plus importantes sont :

- \* Polarisation électronique
- \* Polarisation ionique
- \* Polarisation par orientation
- \* Polarisation interfaciale

On s'intéressera particulièrement à ce dernier mécanisme:

Comme dans un diélectrique les porteurs de charge ne sont jamais totalement absents, ces derniers migrent sous l'effet d'un champ électrique et ont tendance à se concentrer autour de défauts tels que les impuretés, les vacuoles et aussi à l'interface d'un matériau hétérogène. On regroupe sous le nom de polarisation interfaciale, celles résultant des accumulations locales de

charges dues à l'ensemble des phénomènes de migration. Cette polarisation est la plus lente, son temps d'établissement peut atteindre plusieurs minutes [12].

A l'aide de deux propriétés considérées comme indépendantes, la permittivité  $\epsilon$  et la conductivité  $\sigma$ , Maxwell a établi une théorie de l'absorption qui concerne les milieux hétérogènes. Dans un diélectrique homogène, il a montré qu'aucune charge résiduelle ne peut apparaître.

L'association de deux diélectriques homogènes possédant des permittivités et des conductivités différentes est à l'origine du phénomène d'absorption. Il peut s'agir de deux matériaux solides mais aussi d'un matériau complexe constitué d'un solide et d'un liquide.

Soient 2 plaques d'isolants entre les armatures d'un condensateur soumis à un échelon de tension  $V_0$  au temps  $t=0$ , les permittivités relatives des 2 diélectriques sont  $\epsilon_{r1}$ ,  $\epsilon_{r2}$  et les conductivités  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ . On ne considère que la surface unitaire des isolants.

\* Au temps  $t=0$  les inductions électriques  $D_1$  et  $D_2$  sont égales puisqu'il n'y a pas de charges piégées à l'interface, d'où

$$\epsilon_0 \epsilon_{r1} E_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r2} E_2$$

Comme les courants de conduction  $i_{o1}$  et  $i_{o2}$  sont différents dans les 2 couches, il apparaît une charge interfaciale  $q_{i2}$ .

\* Au temps  $t = \infty$  lorsque l'équilibre est atteint :

$$i_{c1} = i_{c2}$$

et donc  $\sigma_1 E_1 = \sigma_2 E_2$

\* Dans la phase transitoire, nous avons :

$$\sigma_1 E_1 - \sigma_2 E_2 = \frac{\partial q_{12}}{\partial t}$$

$$\epsilon_{12} E_2 - \epsilon_{21} E_1 = q_{12}$$

→

$$d_2(t) - d_1(t) = q_{12}$$

→

$$\frac{d}{dt}[d_2(t)] - \frac{d}{dt}[d_1(t)] = \frac{dq_{12}}{dt}$$

[ 1 ]

Or d'après la définition du courant de conduction, on a :

$$\frac{dq_{12}}{dt} = i_{c1} - i_{c2}$$

$$\frac{d}{dt}d_2(t) - \frac{d}{dt}d_1(t) = i_{c1} - i_{c2}$$

le courant traversant chaque diélectrique sera alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 = i_{c1} + \frac{d}{dt}d_1(t) \\ i_2 = i_{c2} + \frac{d}{dt}d_2(t) \end{array} \right.$$

**EXEMPLE**

Si les épaisseurs  $l_1$  et  $l_2$  des deux plaques sont égales c'est à dire  $l_1 = l_2 = l$ , alors à  $t=0$  on aura:

$$\begin{cases} \epsilon_0 \epsilon_{r1} E_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r2} E_2 \\ l (E_1 + E_2) = V_0 \end{cases} \quad [ 2 ]$$

$$\begin{cases} E_1 = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}} \frac{V_0}{l} \\ E_2 = \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}} \frac{V_0}{l} \end{cases}$$

A l'équilibre  $\rho_{e1} = \sigma_1 E_1$  et  $\rho_{e2} = \sigma_2 E_2$

$$\begin{cases} E_1 = \frac{V_0 \sigma_2}{l (\sigma_1 + \sigma_2)} \\ E_2 = \frac{V_0 \sigma_1}{l (\sigma_1 + \sigma_2)} \end{cases}$$

Quant au régime transitoire, on doit prendre en compte les relations [1] et [2], on obtient alors les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} \epsilon_0 (\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}) \frac{d}{dt} e_1(t) + (\sigma_1 + \sigma_2) e_1(t) = \frac{V_0}{l} \sigma_2 \\ \epsilon_0 (\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}) \frac{d}{dt} e_2(t) + (\sigma_1 + \sigma_2) e_2(t) = \frac{V_0}{l} \sigma_1 \end{cases}$$

La résolution de la première équation différentielle donne :

$$e_1(t) = \frac{\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \frac{V_0}{l} + K \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

avec  $K$  constante d'intégration

$$\text{et } \tau = \epsilon_0 \frac{\epsilon_{11} + \epsilon_{12}}{\sigma_1 + \sigma_2}$$

Si l'on détermine  $K$ , on aura :

$$e_1 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \frac{V_0}{l} + \frac{V_0}{l} \left( \frac{\epsilon_{12}}{\epsilon_{11} + \epsilon_{12}} - \frac{\sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$i_1(t) = \frac{V_0}{k(\sigma_1 + \sigma_2)} \left[ \sigma_1 \sigma_2 + \frac{(\sigma_1 \epsilon_{12} - \sigma_2 \epsilon_{11})^2}{(\epsilon_{11} + \epsilon_{12})^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

Le courant  $i_1$  est la somme d'un courant de conduction et d'un courant d'absorption qui décroît exponentiellement .

#### 1.4 DECHARGES A L'INTERFACE LIQUIDE-SOLIDE ISOLANTS;

##### PHENOMENES DE STREAMERS

Grâce à l'utilisation de nouvelles techniques optiques, il a été mis en évidence l'existence de perturbations dénommées "streamers" [16] durant la phase précédent le claquage .

Plusieurs travaux concernant l'étude du mécanisme de streamers ont été effectués. Ces travaux ont porté sur la nature, la forme et la vitesse de propagation de ces streamers dans des volumes d'huile .

Dans ce qui suit nous allons donner le comportement des streamers sur l'interface d'une isolation mixte hétérogène liquide-solide .

#### 1.4.1 Disposition parallèle des isolants

Comme déjà mentionné, les systèmes d'isolation interne des appareils remplis d'huile sont souvent réalisés avec la combinaison d'une huile et d'un solide isolants. En général, l'isolation solide présente une barrière au champ électrique, mais dans les supports et entretoises, ou durant la construction des canaux de refroidissement, des surfaces limites s'établissent entre l'huile et le solide parallèlement aux lignes de champ électrique.

Avec une telle isolation parallèle au champ, on a relevé que la tension de claquage de cette combinaison est inférieure à celle des diélectriques pris séparément [1, 17]. Dans la plupart des cas, le claquage a lieu le long de l'interface entre les deux diélectriques, et ces deux surfaces limites doivent être bien prises en considération.

Les expériences avec des dispositions solide/liquide [18] et solide/gaz [19] ont montré que les interfaces avec de grands rapports des permittivités (le rapport de la permittivité du solide sur celle du liquide ou gaz) tendent à abaisser la tension de génération des décharges.

R.J.Taylor propose un travail similaire [17] avec une interface liquide/solide en prenant plusieurs matériaux solides imprégnés dans des liquides dont la permittivité relative varie entre  $\epsilon_r=2$  et  $\epsilon_r=5$  de telle manière à pouvoir obtenir l'égalité des permittivités pour un matériau solide particulier; d'où des

propriétés de surface uniforme.

Pour cela, il a testé 6 matériaux solides de 5 mm d'épaisseur, découpés en disques de 12 mm de diamètre entre deux électrodes en cuivre en champ uniforme. Trois liquides diélectriques avec différentes permittivités ont été utilisés à savoir l'huile de transformateur ( $\epsilon_r = 2.15$ ), l'huile Aroclor ( $\epsilon_r = 4.85$ ) et l'huile silicone ( $\epsilon_r = 2.6$ ). Les points intermédiaires entre les deux permittivités extrêmes sont obtenus en mélangeant des quantités variables de l'huile de transformateur et l'aroclor [17]. Il est à noter que les solides mis comme entretoise (cale) entre les électrodes ne constituent pas une barrière isolante qui améliorerait la rigidité, car leur dimension est inférieure à celle des électrodes.

Taylor a défini un paramètre appelé "efficacité de l'entretoise" comme étant le rapport:

$$K_1 = \frac{\text{Tension de claquage de l'ensemble liquide/solide}}{\text{Tension de claquage du liquide seul}}$$

il a été choisi pour tenir compte des variations de la rigidité du liquide à chaque valeur de permittivité. Il a aussi défini le rapport de permittivité interfaciale comme étant:

$$\epsilon_1 = \epsilon_s / \epsilon_l \quad \text{avec } \epsilon_s : \text{permittivité du solide.}$$

$$\epsilon_l : \text{permittivité du liquide.}$$

La courbe  $K_1=f(\epsilon_1)$  est illustrée par la figure (1.8).

La figure (1.9) représente la courbe du nombre de cales solides qui ont subi une perforation en fonction de la permittivité interfaciale. Une observation intéressante est à relever: bien que toutes les cales n'ont pas subi de perforation, la majorité

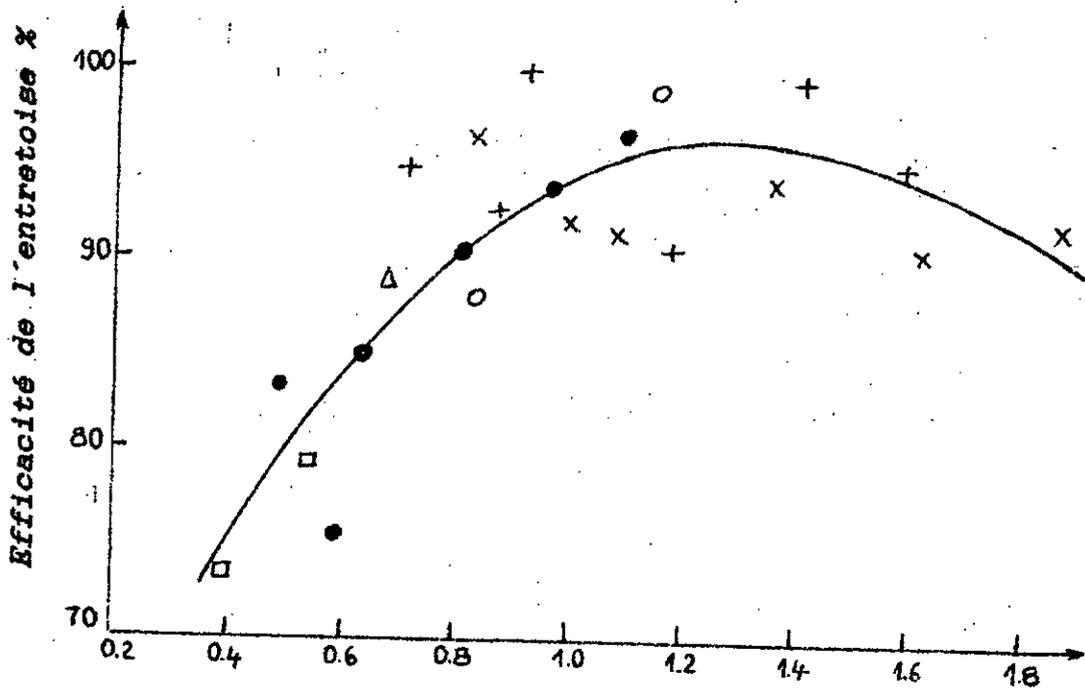


Figure 1.8 : Variation de l'efficacité de l'entretoise avec  $\epsilon_i$

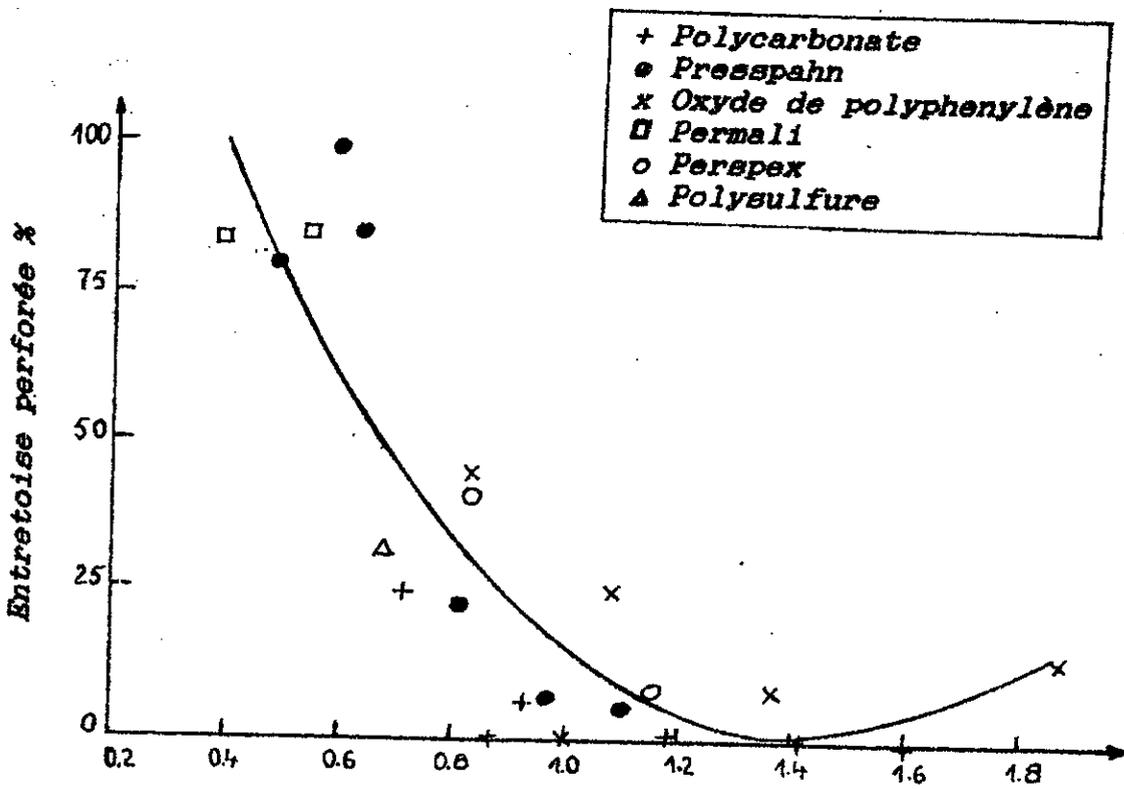


Figure 1.9 : Variation de perforation de l'entretoise avec  $\epsilon_i$

des zones de claquage ont été juste adjacentes à la surface de ces dernières. Dans la disposition parallèle des diélectriques solide et liquide, la tension dans chacun des matériaux est indépendante de la permittivité de l'un ou de l'autre des matériaux [17]. Cependant, l'interface introduit une erreur dans cette appréciation. En effet, les irrégularités de surface (de l'entretaille) de quelques  $\mu\text{m}$ , se présentent en série avec les deux diélectriques et la différence entre leur permittivité provoque une élévation de l'intensité de champ qui dépend à la fois du degré d'inégalité des permittivités, de la forme, et des dimensions de l'irrégularité de surface.

D'après ce qui précède, le processus de décharge électrique serait fonction de  $\epsilon_1$ , et l'efficacité de l'entretaille tend vers 100 % lorsque les permittivités de l'huile et du solide sont égales; de même que l'on s'attend à ce que la courbe de la figure(1.9) atteigne le minimum à  $\epsilon_1=1$ . Il ressort de ce qui précède qu'il y a une grande probabilité pour que le streamer prenne naissance quelque part ailleurs qu'à l'interface.

On remarque que les deux courbes indiquent que les conditions sont défavorables pour la décharge quand  $\epsilon_1=1.3$ . Ceci peut être dû au fait que la majorité des points se trouvent dans la région  $\epsilon_1 < 1.2$ , ou à la distorsion du champ électrique à l'interface : ce champ tend à initier le processus de décharge vu son intensification [17], mais peut également empêcher la décharge en déviant le canal de celle-ci loin de l'interface.

Dans ce contexte, Heurchild [20] a proposé que le processus de

décharge progresse le long de l'interface par sites localisés [21], favorisant ainsi le développement de la décharge.

#### 1.4.2 Disposition des isolants perpendiculairement au champ

Ohgaki et Tsunoda ont étudié en configuration pointe-plan le développement du streamer positif (pointe positive) à l'aide des traces (empreintes) des décharges de surface en utilisant la méthode optique de striescopie (Schliren) [22] sous tension impulsionnelle 0.5/2500  $\mu$ s.

Des pièces isolantes en acrylic d'épaisseur 3.5 mm et 10 mm immergées dans l'huile paraffine ont été utilisées. A partir des photos rapides prises à des temps très brefs on obtient l'évolution temporelle du streamer, (figure 1.10) .

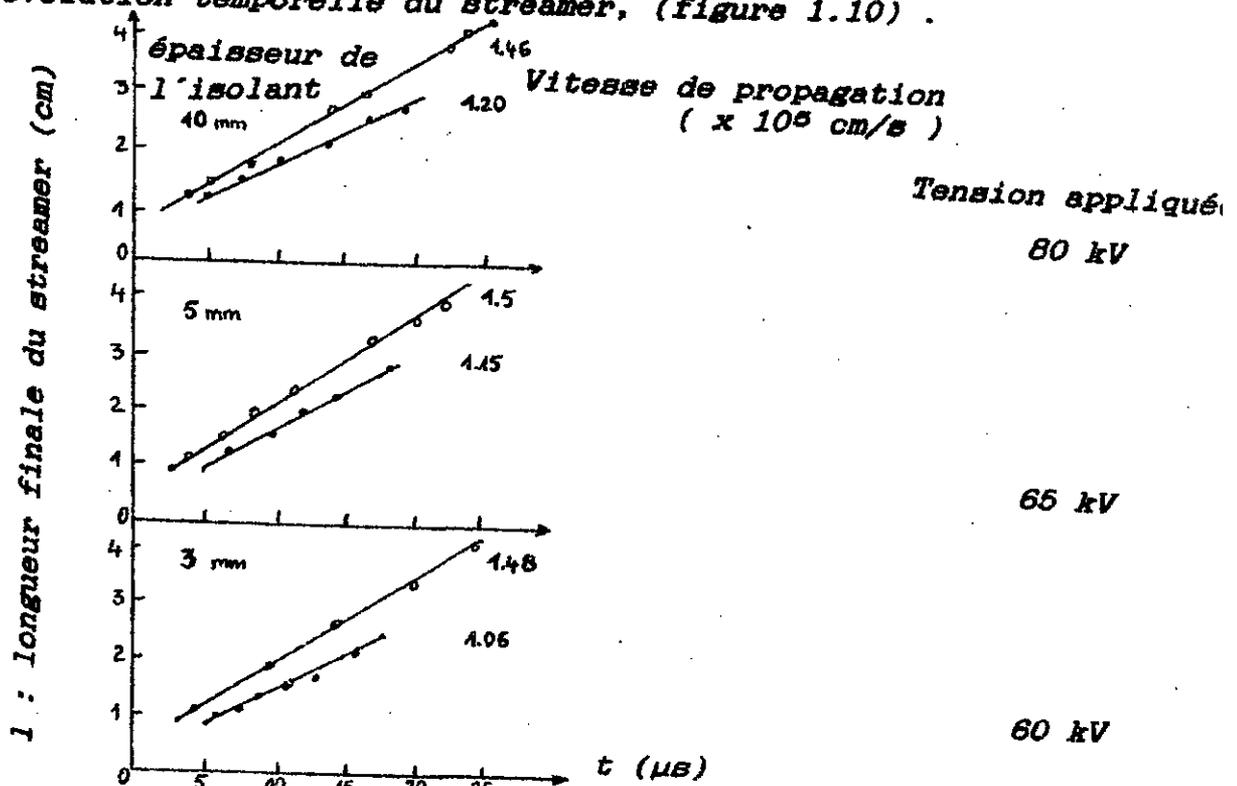


Figure 1.10: Longueur finale du streamer en fonction du temps. "l" étant la longueur du plus grand streamer

On remarque que pour une tension et une épaisseur de l'échantillon d'acrylyc données, le streamer croît de façon constante à partir d'une longueur d'environ 0,5 cm qui semble s'établir avec la portion de la montée de tension. On estime aussi l'ordre de grandeur de la vitesse à 1 km/s. Une telle vitesse a été aussi trouvée par Devins et al [23] pour des streamers positifs en champ électrique non uniforme dans l'huile MARCOL 70 sous une tension de même type que celle utilisée par Ohgaki.

Nous retrouvons aussi ce résultat dans le cas d'un interface entre le verre/huile de transformateur étudié par Atten et Saker [24] aussi bien en polarité positive que négative de la pointe. Nous remarquons en outre que le streamer positif est plus rapide que le streamer négatif (figure 1.11). Ceci est compatible avec les résultats obtenus par BEROUAL dans les volumes de liquide isolant en géométrie pointe-plan sous créneau de tension, à savoir que les streamers positifs sont filamenteux et leur vitesse moyenne est supérieure (2 à 50 fois) à celle des streamers négatifs. Les streamers négatifs sont lents et leur allure rappelle celle des buissons [16, 25]. Notons enfin que pour différentes épaisseurs de l'isolant solide, la vitesse de propagation a très peu varié, et qu'elle ne représente que 55 à 70 % de celle des streamers se propageant dans un volume de liquide diélectrique en géométrie pointe-plan [24]

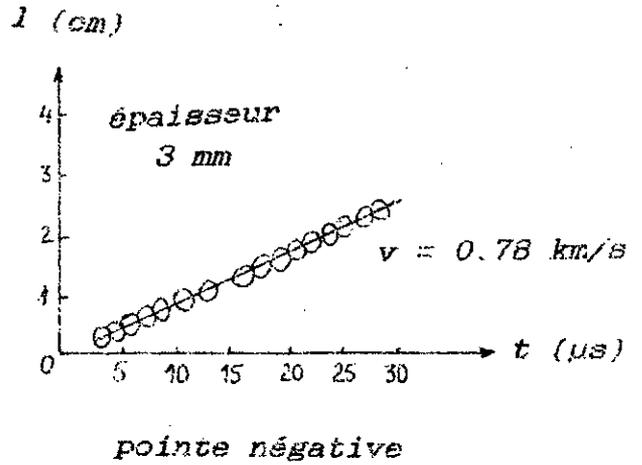
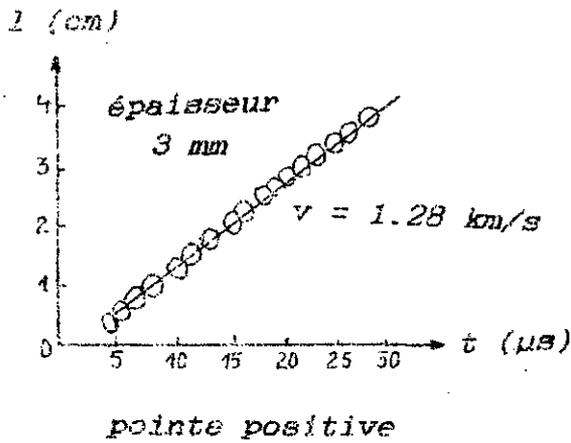


Figure 1.11: Longueur du streamer en fonction du temps .

D'autre part, la vitesse de propagation du streamer est proportionnelle à la tension (figure 1.12) avec une dépendance de l'épaisseur de l'isolant solide, ceci rejoint aussi les résultats trouvés par Devins et al [23].

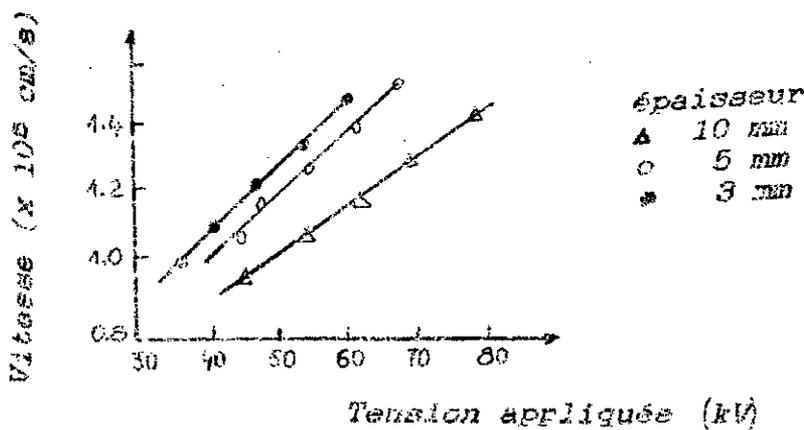
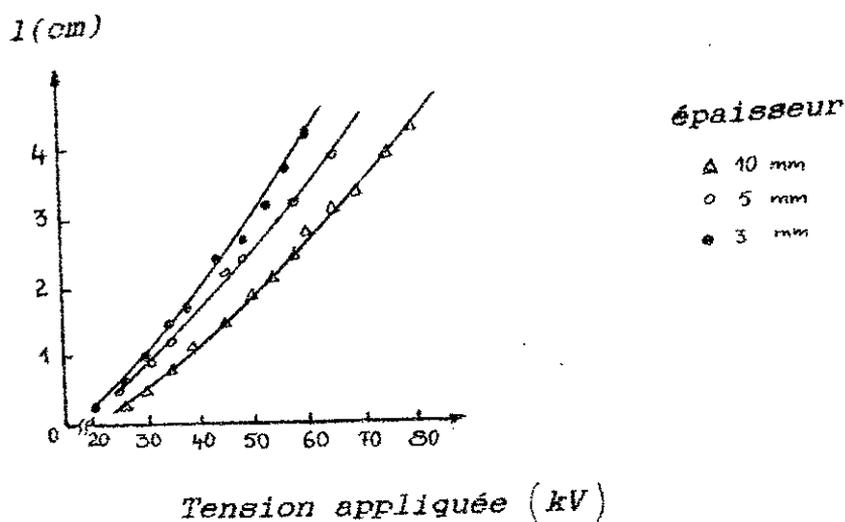


Figure 1.12: Vitesse du streamer en fonction de la tension

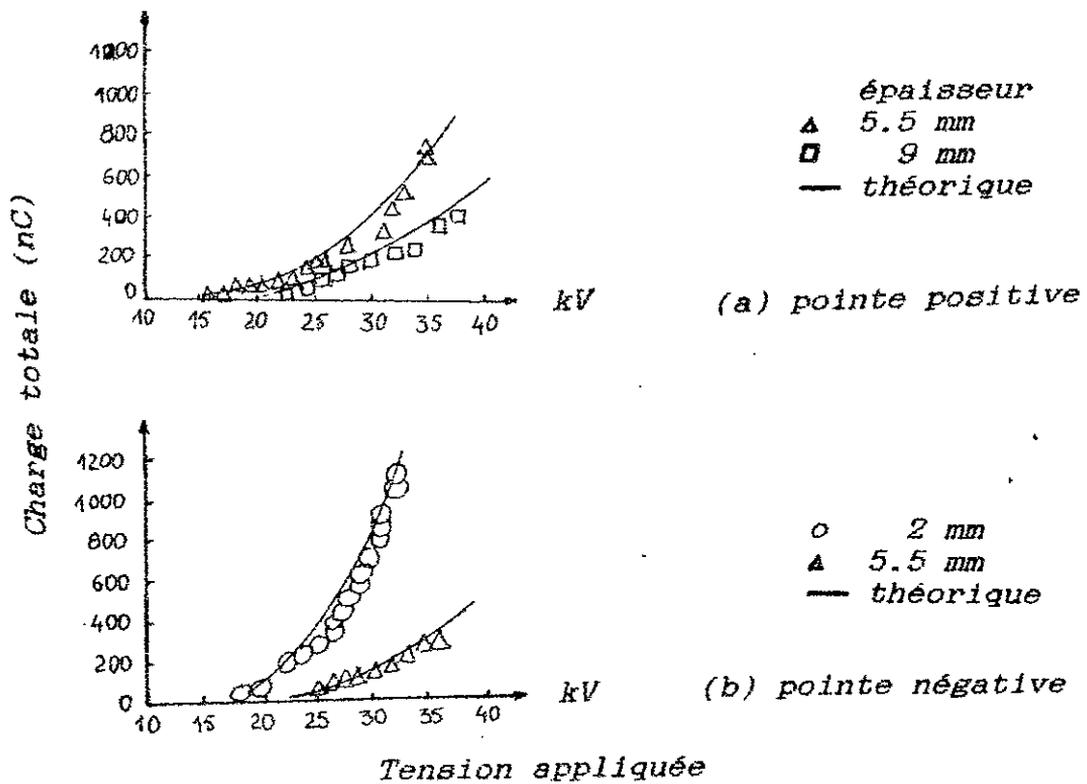


**Figure 1.13:** Longueur finale du streamer en fonction de la tension

La figure (1.13) représente la courbe de la longueur finale du streamer en fonction de la tension appliquées pour différentes épaisseurs. Dans chacun des cas, la longueur croît de façon plus que proportionnelle avec la tension [22].

Comme dans les volumes de liquides diélectriques, il existe une relation étroite entre la forme du streamer, sa vitesse de propagation, la lumière émise, les courants et par conséquent la charge quelque soit la polarité des électrodes [16].

La figure (1.14) donne la charge en fonction de la tension [24]. Un modèle théorique a été proposé par ATTEN et SAKER [24] et les résultats expérimentaux sont très compatibles avec ceux calculés.



**Figure 1.14:** Charge totale en fonction de la tension appliquée

### 1.5 FACTEURS AFFECTANT LA PROPAGATION DES STREAMERS SUR L'INTERFACE LIQUIDE-SOLIDE

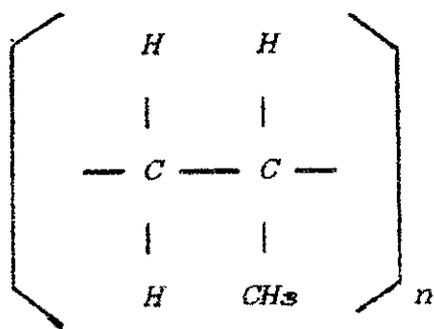
Les systèmes d'isolation en papier imprégné d'huile ont été largement utilisés en haute tension dans les câbles de transport et les condensateurs de puissance [26]. Cependant, les pertes diélectriques du papier, relativement importantes, constituent un inconvénient qui prend de plus en plus de l'importance suivant que la tension de service augmente et deviennent inacceptables à plus de 700 kV [27].

Un intérêt particulier a été porté ces dernières années sur les polymères imprégnés d'huile isolante [6, 7, 17, 22, 24, 27].

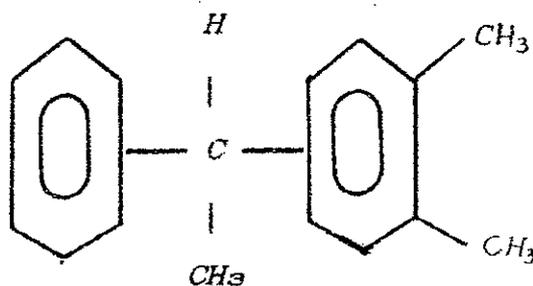
Plusieurs travaux ont été entrepris sur la conduction, le claquage et les phénomènes diélectriques de l'huile/polymère. Cependant, les relations entre les propriétés électriques et les interactions huile-polymère ont fait l'objet de peu de publications. Nous allons présenter les résultats de quelques travaux à ce sujet.

### 1.5.1: Effet des traitements de surface sur la conduction des systèmes mixtes huile/polymère

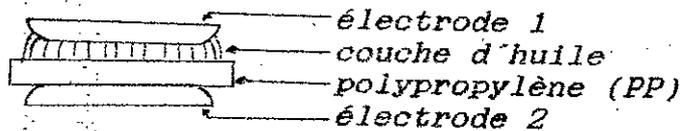
Une grande dépendance de la conduction électrique sur l'interface huile/polymère est due essentiellement à l'interaction de l'huile avec le polymère. Dans ce sens, OCHIAI et IWASAKI [7] ont étudié la conduction sur des surfaces traitées de films en polypropylène (PP) de 22 $\mu$ m d'épaisseur imprégnés dans de l'huile diaryléthane (viscosité=6,3 cst) dont les structures chimiques sont les suivantes :



Polypropylène



Huile diaryléthane



**Dispositif expérimental**

Le dispositif expérimental ci-dessus montre que la couche d'huile se trouve sur une seule face du film de (PP) mis entre électrodes. On a alors mesuré le courant de charge à une certaine température [7]. Les figures (1.15) et (1.16) montrent la densité de courant pour huile(-)/PP et huile(+)/PP respectivement .

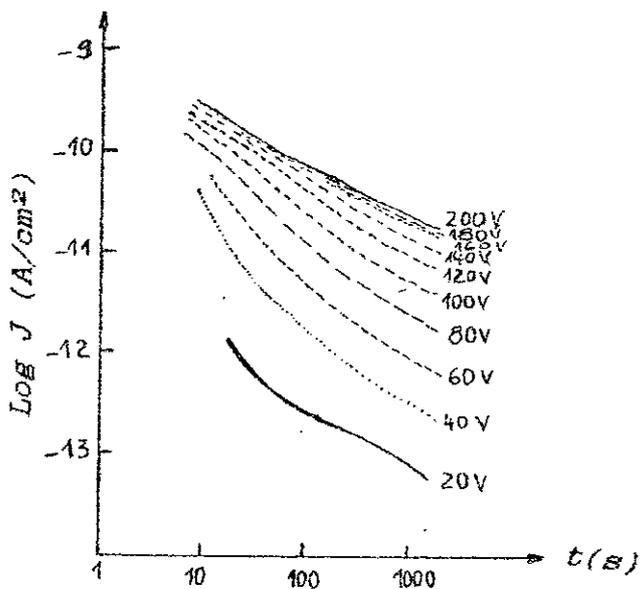


Figure 1.15: Densité de courant de charge pour huile(-)/PP (l'huile au contact de la cathode)

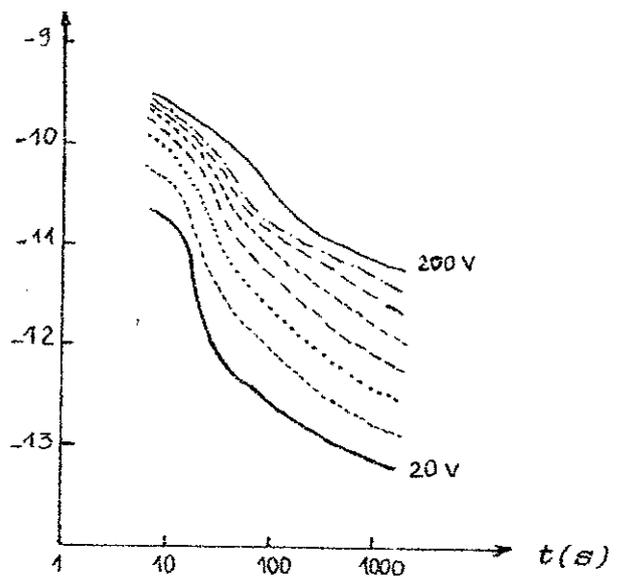


Figure 1.16: Densité de courant de charge pour huile(+)/PP T=50° C

Pour les deux polarités, le courant est 4 fois plus grand pour l'huile/PP que pour le PP seul [7]. Ceci laisse à suggérer

que l'augmentation du courant de charge est due aux interactions huile-polymère. Ces deux courbes nous montrent aussi l'effet de la polarité. En outre, le courant de charge montre une saturation avec l'élévation de la tension, ceci est dû à la limitation du réservoir des porteurs de charges.

Les figures (1.17) et (1.18) représentent le courant de charge pour huile(-)/PPa et huile(+)/PPa (PPa est le PP traité par l'acétone), le film de PP était immergé dans de l'acétone pendant 30 mn puis séché dans une enceinte vidée d'air avant d'être placé entre électrodes.

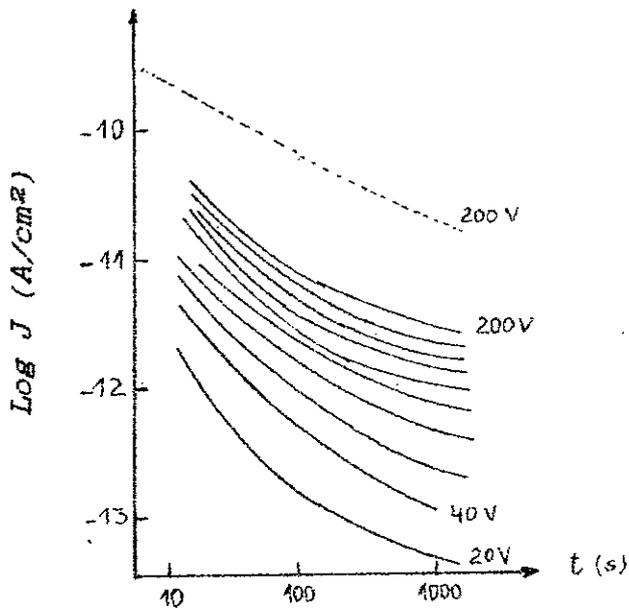


Figure 1.17 Densité de courant de charge pour huile(-)/PPa (en pointillé huile(-)/PP)

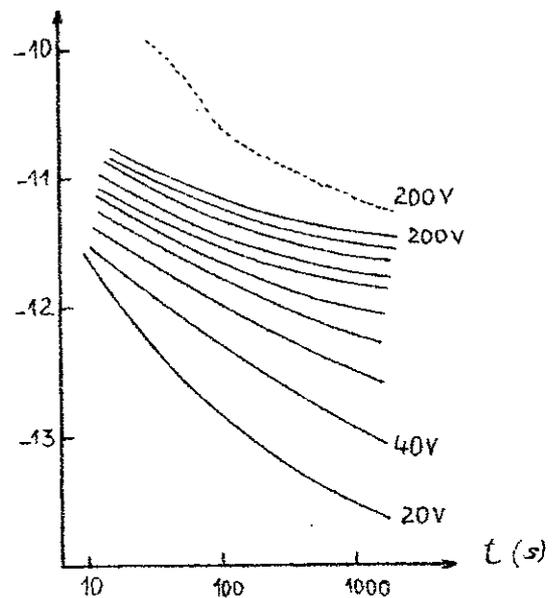


Figure 1.18 Densité de courant de charge pour huile(+)/PPa (en pointillé huile(+)/PP)

à  $T = 50^{\circ}\text{C}$

On remarque que le courant dans l'huile(-)/PPa est plus faible que celui de l'huile(-)/PP, il en est de même pour la polarité positive.

Le traitement par l'acétone réduit le courant de charge, il enlève les impuretés qui existent sur la surface de PP. Comme on l'a mentionné auparavant, les courants sur l'interface de l'huile(-)et(+)/PP présentent une saturation aux tensions élevées; les courants dans l'huile(-)et(+)/PPa sont par contre proportionnels à la tension.

La figure (1.19) représente les courants de charge pour huile(-)/Surface Rugueuse de PP (huile(-)/SR.PP). Ils sont considérablement plus grands que ceux de l'huile(-)/PP. Il y a plusieurs facteurs qui font augmenter le courant de charge dans le SR.PP à savoir [7]:

- a) Augmentation des zones de contact entre le (SR.PP) et les électrodes .
- b) La surface du PP avec surface rugueuse doit contenir plus d'impuretés que le PP.
- c) L'élévation du champ électrique local due à la rugosité du PP contribue à l'injection des ions de l'huile au PP. En plus, le champ électrique élevé engendre l'électroosmose [6, 7], par conséquent l'huile pénètre facilement dans le polypropylène et aide les ions à se déplacer à travers le PP.

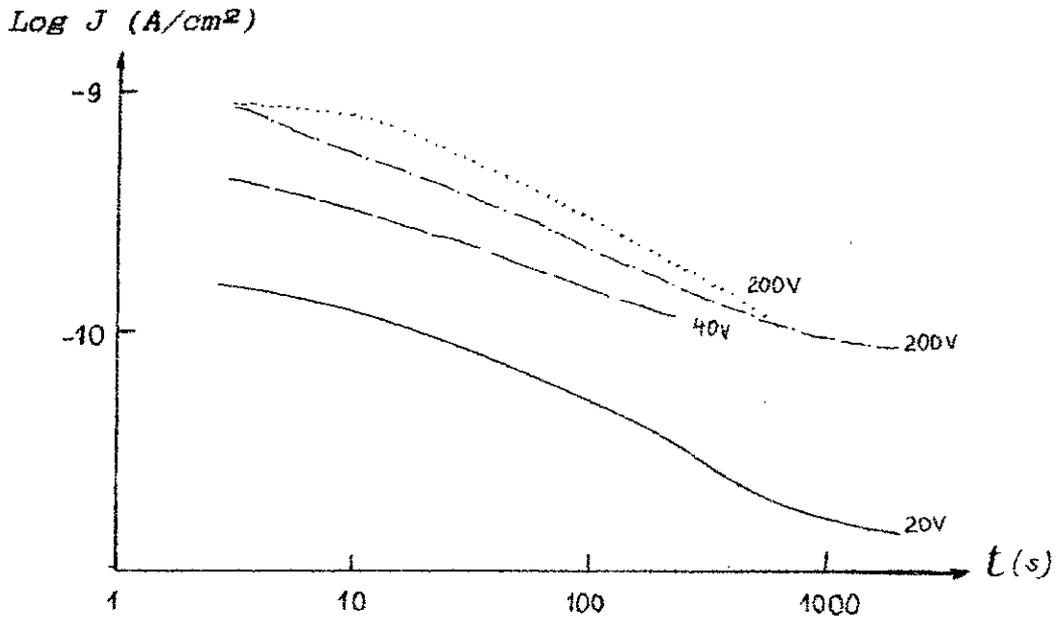


Figure 1.19 : Densité de courant de charges pour huile (-) / SR.PP à  $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Enfin, la figure (1.20) illustre la relation temporelle du courant de charge de l'huile(-)/SR.PPa. L'effet du traitement à l'acétone est plus effectif dans ce dernier que dans l'huile (-) /PP. Cela explique le fait que la SR.PP contient beaucoup plus d'impuretés et ceci conforte la deuxième raison évoquée précédemment ; cependant, jusqu'à présent on ne sait quel processus de b) ou c) cités plus haut est le plus dominant [7].

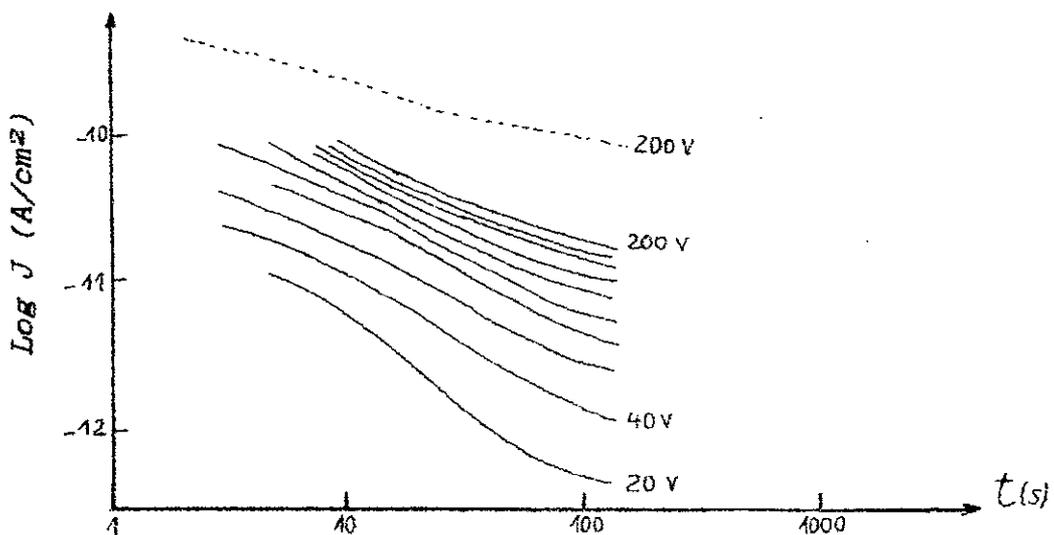


Figure 1.20 : Densité de courant de charges de l'huile(-)/SR.PPa (en pointillé, huile(-)/SR.PP)

Nous retenons en définitive que :

- 1- L'origine des porteurs de charges dans l'interface huile/PP se trouve sur la surface du polypropylène.
- 2- Les impuretés sur la surface du PP pour l'huile/SR.PP sont plus importantes que pour l'huile/PP.
- 3- La conduction électrique du système huile/PP est considérablement affectée par l'interaction huile-polymère.

#### 1.5.2 Effet des décharges partielles sur le système d'isolation mixte polyéthylène/huile :

Le polyéthylène est un matériau isolant intéressant pour ses faibles pertes diélectriques ( $3.10^{-4}$ ) et son coût relativement bas. Il remplace de plus en plus dans l'industrie le papier imprégné. Dans ce qui suit, on va évoquer le comportement du polyéthylène (PE) soumis aux décharges partielles en champ électrique uniforme et non uniforme ; en particulier, on examinera la relation entre l'énergie de décharge et le claquage du système.

Pour simuler la structure de l'isolation du câble de puissance, Danikas et al [27] ont construit des échantillons isolants qui consistent en des couches de films de 25,4 mm de large installés côte à côte en laissant des espaces entre les bords des films. Le nombre et les amplitudes des décharges partielles sont enregistrés par un détecteur de charges puis traités par un analyseur d'impulsions. Le système ainsi formé comprend 5 à 10 couches d'épaisseur 0,25 mm de PE, chaque couche est formée de 3 à 4

films entre lesquels est laissé un espace de 1 à 2 mm ; ces espaces sont alternés entre les différentes couches de telle manière à occuper toute la surface de l'électrode plane qui est de 12,8 cm de diamètre. Le système est soumis à une tension alternative en champ uniforme (plan-plan de diamètres différents) et non uniforme (pointe-plan). Il n'a été pris compte que des décharges dont l'amplitude est supérieure ou égale à 100 pC qui sont considérées être à l'origine d'une détérioration significative de l'isolation.

L'huile d'imprégnation est le Dodécylbenzène [27] de faible viscosité. L'ensemble (dispositif et cellule d'essai) est mis dans une enceinte sous vide pour supprimer l'influence de l'humidité dans l'air. Pour le système d'électrodes pointe-plan, on a utilisé un échantillon d'épaisseur totale 1,25 mm et 2 mm d'espace entre les différents films sous une tension dont la montée est de 2 kV/s jusqu'à 20 kV, puis 2 kV toutes les 30 minutes jusqu'à apparition de la décharge.

Il est généralement considéré [28] que l'amplitude maximale de la décharge, ou l'énergie totale seule de la décharge ne peuvent nous renseigner de l'effet des décharges sur l'isolation.

L'énergie de décharge fournie à l'échantillon [29] est exprimée par l'équation :

$$E_T = \sum V_i Q_i$$

où  $E_T$  est l'énergie fournie par la source pendant la période  $T$  durant laquelle  $N$  décharges sont produites.

$Q_i$  et  $V_i$  sont respectivement la charge apparente dans la décharge et la tension appliquée au moment de la décharge.

Dans le cas qui nous concerne, on peut écrire :

$$E_T = V \sum Q_i \quad \text{où } V \text{ est la valeur de crête de la tension d'application au moment de la décharge.}$$

Il a été constaté que lorsque les décharges partielles apparaissent, en même temps une lumière est émise autour de la pointe et lorsqu'on coupe la tension, des bulles sont observées sur l'interface huile/film PE près de l'électrode pointe. Les résultats nous montrent que le système film PE/huile est détérioré (parfois jusqu'au claquage) par les décharges partielles, la détérioration est cependant différente d'un échantillon à l'autre pour les mêmes conditions d'expérimentation. Elle se manifeste par une simple décoloration jusqu'au claquage, en passant par du noircissement de certaines zones, ou formation d'arborescences. La courbe de la figure (1.21) nous montre l'énergie totale de décharge en fonction de la surface totale endommagée (toutes détériorations confondues). Les deux quantités paraissent dépendantes mais le nombre d'échantillons expérimentés est relativement faible [27] pour confirmer une telle corrélation.

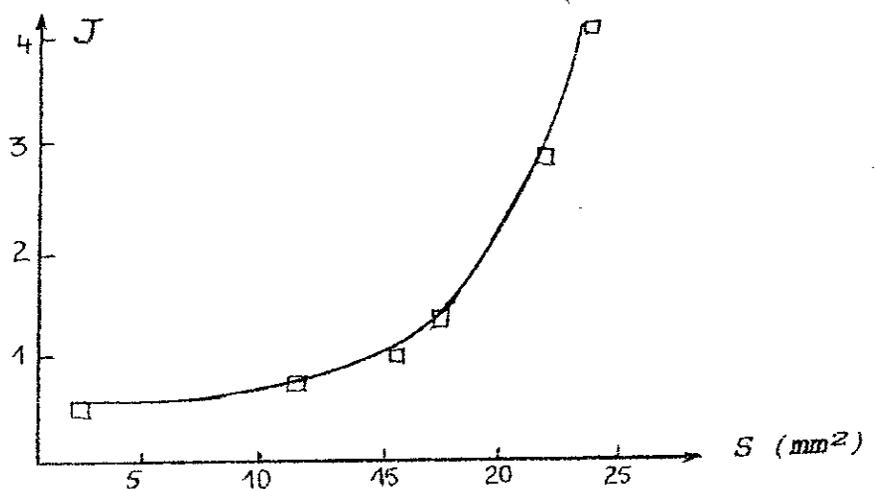


Figure 1.21: Énergie de décharge en fonction de la surface endommagée

En champ uniforme, la tension est augmentée de 1kV toutes les 5 mn jusqu'à apparition des décharges. L'interface film PE/huile subit une détérioration à partir d'un nombre de décharges relativement plus faible que pour le système plan-plan [27]. Dans cette configuration d'électrodes, les décharges sont distribuées sur une large surface et non concentrées en un point; les tensions d'apparition des décharges sont supérieures à celles du système pointe-plan. Toutefois, pour le système pointe-plan, des échantillons identiques soumis à des tensions dans presque les mêmes conditions ne présentent pas toujours le même type de détérioration; Comme l'ont déjà mentionné Atten et Saker [24], les décharges ne sont pas reproductibles car les différents canaux et leurs branches changent d'une décharge à l'autre.

En outre, dans la majorité des cas, les décharges sont accompagnées d'émissions lumineuses distribuées uniformément mais n'apparaissent pas dans les espaces entre les films de PE.

Nous concluons que les décharges partielles détériorent les systèmes d'isolation polymère imprégné, mais l'intensité de la détérioration n'est pas directement corrélée avec l'amplitude des décharges bien qu'en champ non uniforme, ces deux paramètres présentent une certaine corrélation.

#### 1.6 MODELE DE PROPAGATION DES STREAMERS SUPERFICIELS

Il existe peu de modèles permettant d'estimer la vitesse de propagation des streamers. Dans ce qui va suivre, nous exposerons le modèle d'ANDERSON et LIAO [32] qui permet de donner des valeurs proches de celles mesurées.

La figure (1.22) représente un modèle du streamer principal qui se propage sur un isolant solide. On suppose que la région environnant le canal de la décharge est homogène et isotrope, de même que le streamer principal est un streamer "minimal" c'est à dire qu'il représente la condition minimale possible pour la propagation. Dans ces conditions, la densité de charge, la dimension du canal et la vitesse de propagation sont minimales. Ainsi des approximations concernant les caractéristiques du canal sont prises en compte.

canal cylindrique de densité de charge  $q_c$  radialement uniforme

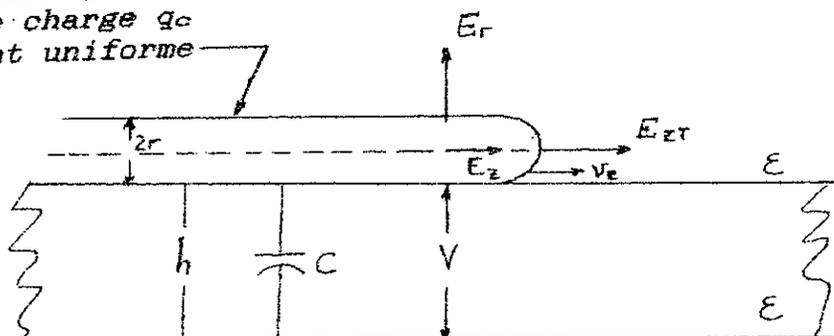


Figure 1.22: Modèle théorique d'un canal de streamer superficiel

La densité de charge du canal de rayon  $r$ ,  $q_c$  est donnée par :

$$q_c = \frac{2\epsilon E_r}{r} \quad [1.1]$$

où  $\epsilon$  est la constante diélectrique du solide et du liquide  
 $E_r$  est le champ électrique radial .

La densité de courant axial est donnée par :

$$i_z = q_c K E_z \quad [1.2]$$

avec  $E_z$  champ électrique axial dans le canal du streamer  
 K la mobilité des électrons dans l'huile, elle est de  
 l'ordre de  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{V.s}$

L'équation (1.2) est l'expression de la conduction normale à partir de laquelle on peut tirer le courant total du canal du streamer (de quelques mA).

En combinant les équations (1.1) et (1.2) on obtient :

$$R = \frac{l}{2\pi r e E_z K} \quad [1.3]$$

pour des rayons du canal  $r$  faibles, on peut obtenir une résistance linéaire  $R$  de quelques dizaines de  $\text{M}\Omega/\text{m}$ .

La capacité  $C$  du canal est donnée par :

$$C = \frac{24}{\log_{10} \frac{2h}{r}} \quad [1.4]$$

La valeur de cette capacité est d'environ  $0.5 \mu\text{F}/\text{cm}$  de longueur, ainsi la constante de temps de charge du canal du streamer ( $RC$ ) sera de l'ordre de 10 à 50  $\mu\text{s}$  par centimètre de longueur. Cette valeur est proche du temps moyen de propagation des streamers (environ  $5 \mu\text{s}/\text{cm}$ ) rapporté dans la littérature [32].

D'autre part, la vitesse de propagation des électrons en tête du canal donne une valeur approximative de la vitesse de propagation des streamers :

$$v_z = KE_{zf} \quad [1.5]$$

où  $E_{st}$  est le champ électrique axial en tête de streamer et qui représente le champ électrique de claquage de l'huile.

Quant au potentiel à la terre  $V$ , il a pour expression :

$$V = \frac{Q}{C} \quad [1.6]$$

par substitution des équations [1.1] et [1.4] dans [1.6] on aura, après avoir tiré  $Q$  de l'équation [1.1] :

$$V = \frac{\pi r^2 E_{st} \log_{10} \frac{2h}{r} 10^{12}}{12} \quad [1.7]$$

Cette expression donne aussi un même ordre de grandeur du potentiel à la terre (appliqué à l'isolant solide) comme cela a été mesuré par ailleurs [205].

\*\*\*\*\*

*C H A P T E R II*

\*\*\*\*\*

## II. TECHNIQUE EXPERIMENTALE

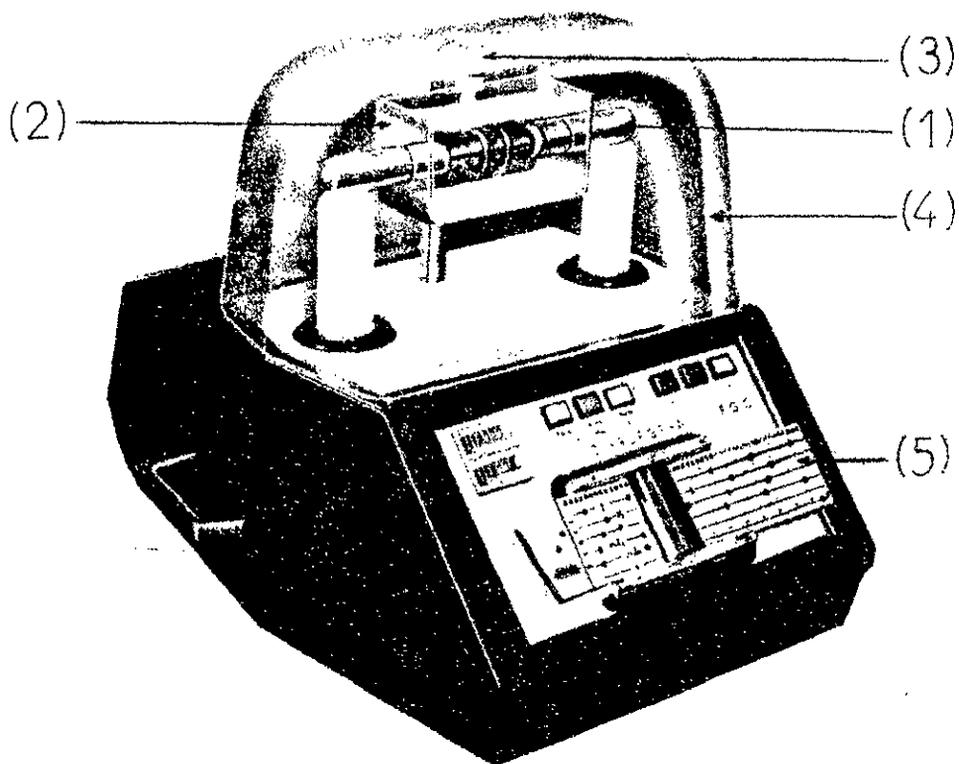
### INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous décrirons le dispositif expérimental utilisé, ainsi que les propriétés des polymères testés. nous expliquerons également la technique de mesure de la longueur des streamers.

### 2.1 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental est constitué d'un spintermètre type PGO à tension alternative (figure 2.1) dont les caractéristiques électriques sont [30] :

- \* Tension d'alimentation ..... 110- 220- 230 V 45-60 Hz
- \* Haute tension maximale  
entre les électrodes ..... 0-60, 0-75, 0-90 kV eff
- \* Puissance instantanée  
du transformateur HT ..... 1.4 kVA
- \* Montée de tension ..... 2 kV/s



*Figure 2.1 : Spintermètre type PGO*

- (1) Electrodes interchangeables*
- (2) Cellule d'essai*
- (3) Pompe pour homogénéiser l'huile*
- (4) Couvercle de protection*
- (5) Carte métallique perforée*

Le spintermètre est schématisé par la figure (2.2)

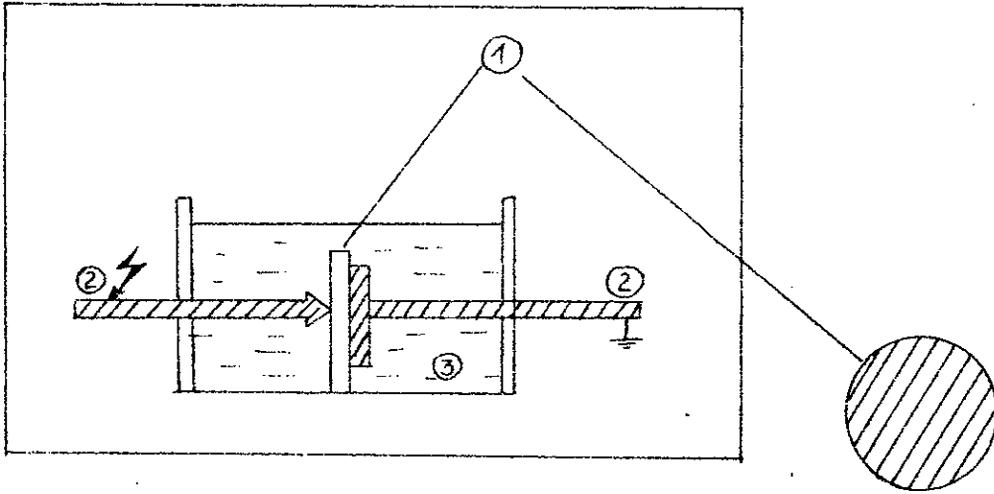


Figure 2.2: Schéma du spintermètre  
(1) Isolant solide en polymère  
(2) Electrodes interchangeables en laiton  
(3) Huile isolante

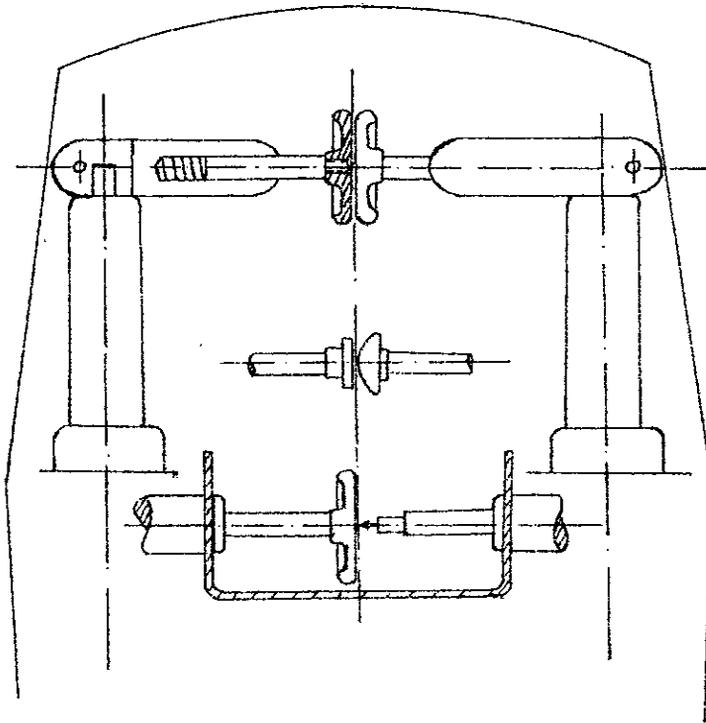


Figure 2.3 : Schéma de la cellule d'essai avec le système d'électrodes interchangeables

La montée de tension s'effectue automatiquement à vitesse constante (2kV/s): on peut l'arrêter à n'importe quel niveau choisi au préalable. Dans le cas contraire, la tension augmente jusqu'au claquage.

Le spintermètre est muni d'un couvercle transparent permettant d'observer les phénomènes qui se produisent dans la cellule d'essai (figure 2.1): celle-ci est en verre et comporte un système d'électrodes en laiton interchangeables (figure 2.3).

Les électrodes utilisées sont:

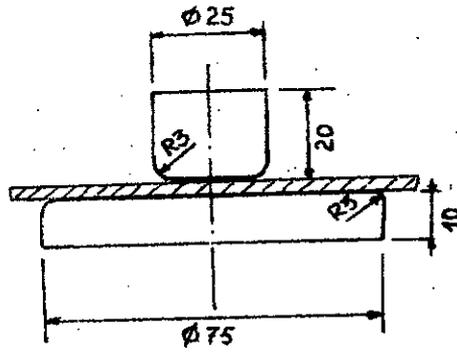
- \* Deux électrodes planes de diamètres 75 mm /grand plan/ et 25 mm /petit plan/ (figure 2.4).

- \* Une électrode pointe de rayon de courbure de 5  $\mu\text{m}$ .

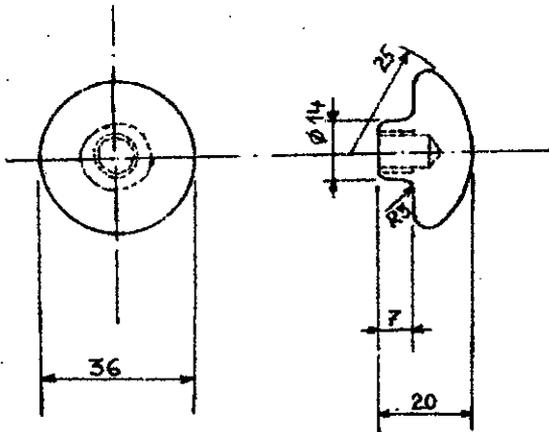
- \* Une électrode sphère (figure 2.5).

- \* Des électrodes pointes de différents rayons de courbure fabriquées au laboratoire HT de l'ENP par le procédé d'électroérosion.

En outre, le spintermètre est muni d'une pompe qui permet d'homogénéiser l'huile et d'éliminer les bulles d'air qui s'y trouvent particulièrement après tout essai où l'on a enregistré une propagation d'un streamer (figure 2.1). La pompe ne provoque aucune bulle d'air puisque l'entrée de l'huile s'effectue axialement à la partie inférieure du cylindre de la pompe [30], alors que la sortie se fait tangentiellement entre les électrodes.



**Figure 2.4 : Schéma des électrodes planes entre lesquelles est insérée l'éprouvette en polymère**



**Figure 2.5 : Schéma de l'électrode à calotte sphérique**

La mise en marche et l'arrêt de la pompe, et la mise sous tension se font automatiquement à l'aide d'une carte métallique perforée suivant la norme CEI /Publication 1956/ (figure 2.1). Cette carte est perforée de manière à ce qu'il y ait 4 minutes entre 2 essais consécutifs, en tenant compte du temps de mise au point de l'essai, il se passe au moins 5 mn entre 2 essais; ce qui permet la disparition des bulles d'air éventuellement formées.

Les huiles utilisées sont les suivantes:

- \* huile de transformateur. BORAC 22
- \* huile de commande hydraulique Aéro-Shell utilisée surtout dans les disjoncteurs haute tension.

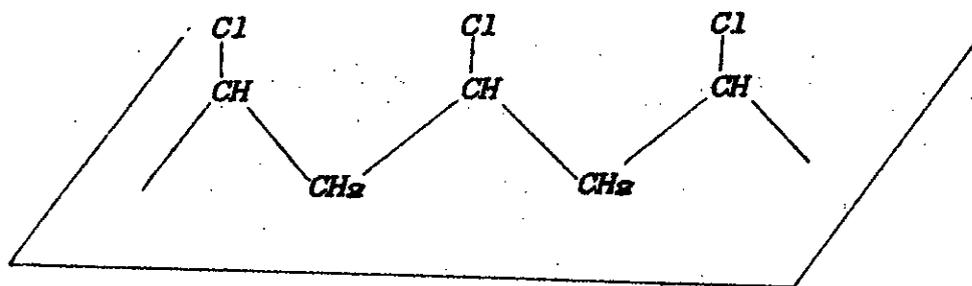
## 2.2 ECHANTILLONS ETUDIÉS

Les isolants solides utilisés sont des échantillons de polychlorure de vinyle (PVC) fabriqués à partir de granulés 1568, et d'Éthylène-Propylène-Diène Modifié (EPDM) fournis par l'ENICAB, de forme circulaire de 80 mm de diamètre et d'épaisseurs variables de 2 à 10 mm.

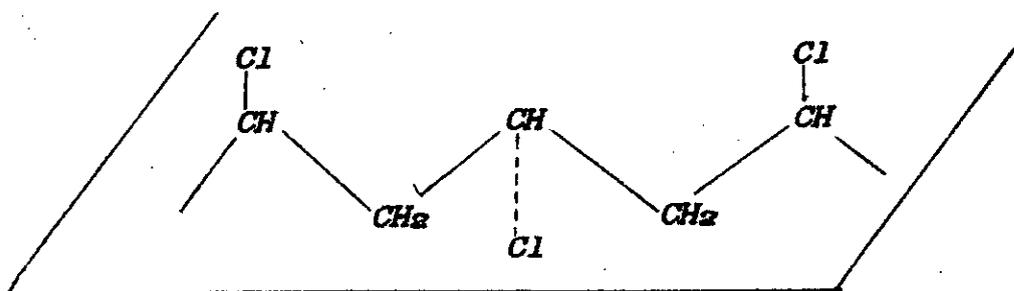
### 2.2.1 Le P.V.C. :

C'est un polymère dont la formule développée du motif monomère est le  $\text{CH}_2=\text{CHCl}$ , c'est un matériau macro-moléculaire constitué par la répétition régulière de chlorure de vinyle. Selon la configuration des groupements latéraux Cl, le PVC peut prendre trois formes stéréoisomériques [31] (figure 2.6).

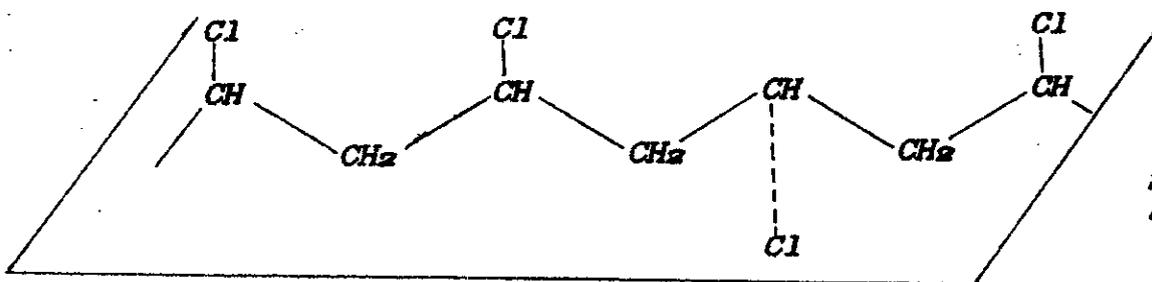
- a) La forme isotactique : Les groupes chlore Cl sont tous situés du même côté de la chaîne principale.
  
- b) La forme syndiotactique : Les groupes Cl sont situés alternativement de part et d'autre du plan de la chaîne principale.
  
- c) La forme atactique : Les groupes Cl sont répartis au hasard le long de la chaîne principale.



(a)  
Séquence  
isotactique



(b)  
Séquence  
syndiotactique



(c)  
Séquence  
atactique

Figure 2.6

Si les deux types de séquence (a) et (b) coexistent dans la même chaîne, on l'appellera polymère hétérotactique. Les polymères à forte prédominance iso ou syndiotactique sont dits stéréoréguliers, ils peuvent généralement cristalliser.

Les polymères contenant une fraction importante d'enchaînements hétérotactiques, c'est à dire dans lesquels les séquences iso ou syndiotactiques sont courtes, sont dits atactiques [31], leur structure est trop irrégulière pour donner lieu à une cristallisation. Si dans les formes syndiotactiques, la chaîne a la forme d'un zigzag plan, dans les séquences isotactiques par contre, l'encombrement des groupes latéraux ou la répulsion électrostatique entraînent une torsion de la chaîne en hélice.

La disposition aléatoire des atomes de chlore (molécule atactique) dont le diamètre est plus grand que celui des atomes d'hydrogène empêche la formation des zones cristallines [12].

Le PVC est essentiellement amorphe; le moment dipolaire de la liaison C-Cl crée des forces d'interaction dipolaires entre chaînes voisines, responsables de la rigidité mécanique du PVC.

Il existe différents procédés de polymérisation dont:

- La polymérisation
- en masse
  - en solution
  - en émulsion
  - par addition
  - par condensation

Pour le PVC, on utilise beaucoup plus la polymérisation en masse qui présente l'avantage de ne laisser comme impuretés dans le polymère que les restes de catalyseurs, le PVC présente donc une pureté élevée.

### 2.2.2 1' E.P.D.M. :

Les polymères formés par un seul type de monomère sont appelés homopolymères (exemple PVC), ceux qui sont formés de deux ou plusieurs types de monomères sont dits copolymères, c'est le cas de l'EPDM. On comprend alors la complexité des structures (qui sont nombreuses) des copolymères par rapport aux homopolymères puisqu'elles dépendent de la disposition régulière ou aléatoire des différents monomères le long des chaînes.

Le copolymère obtenu par la réaction de molécules d'Ethylène et de Propylène en concentrations molaires égales est connu sous le sigle E.P.R (Ethylène-Propylène-Rubber) [12].

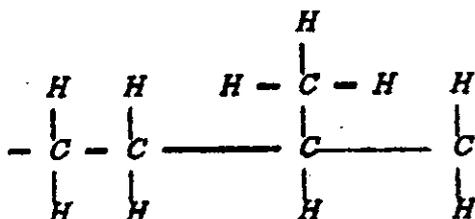


Figure 2.7 : E.P.R

La formule ne présente pas de double liaison, l'E.P.R présente une excellente résistance à l'oxydation, également en présence d'ozone [12].

En ajoutant à l'E.P.R, dans une concentration molaire de 2 à 3% un Diène (hydrocarbure possédant une double liaison) du type représenté par la figure (2.8) on obtient un E.P.D.M .

Ses qualités électriques sont identiques à celles de l'E.P.R et sont très satisfaisantes. L'avantage de l'E.P.D.M sur l'E.P.R est surtout son meilleur état de surface. L'E.P.D.M est largement utilisé dans le domaine de la haute tension.

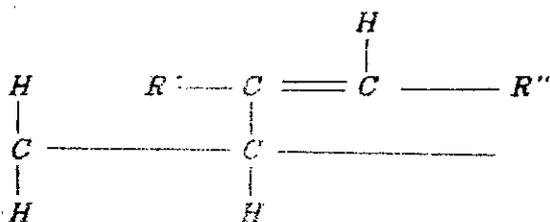


Figure 2.8 E.P.D.M

R' et R'' sont des alkyles, groupement dérivant d'un alcane  
 exemple : méthyle, éthyle, propyle .

### 2.3 TECHNIQUE DE MESURE

On remplit la cellule d'essai d'environ 1 litre d'huile puis on insère l'échantillon de polymère entre les électrodes. L'échantillon est ainsi bloqué entre les électrodes. L'huile est versée lentement dans la cellule d'essai pour éviter la formation de bulles d'air.

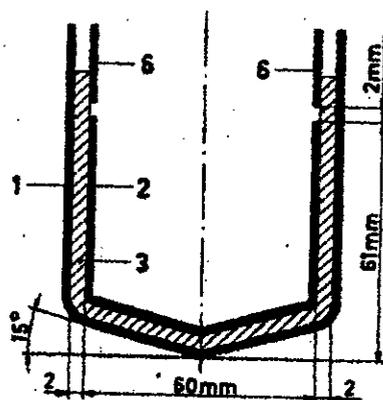
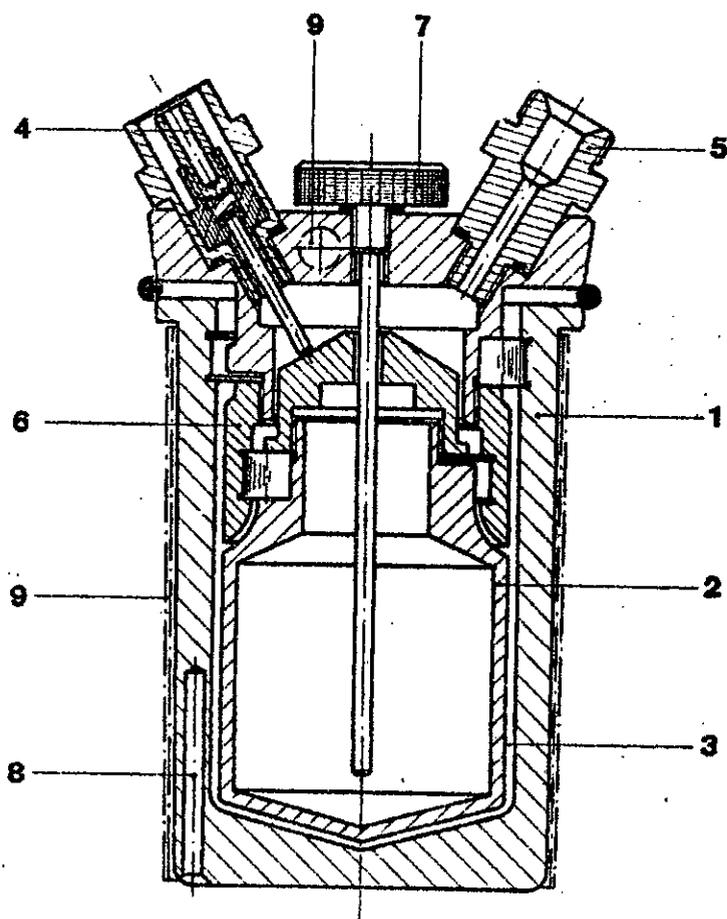
Les échantillons de PVC et d'EPDM ne sont utilisés qu'une seule fois pour une tension donnée. Quant à l'huile, elle est remplacée à chaque fois qu'il y a claquage, ou après un certain nombre d'essais (environ 10) sans qu'il y ait claquage.

Avant chaque série d'essais, nous procédons au nettoyage des électrodes (à l'exception des pointes) à l'acétone puis au traitement de leur état de surface (polissage).

La mesure des paramètres spécifiques des échantillons (liquide et solide) a été effectuée à l'aide des condensateurs à anneau de garde [33]. Ce sont des cellules de mesure destinées à l'exécution des mesures diélectriques sur des éprouvettes de matières isolantes, et en particulier à la détermination du facteur de pertes diélectriques  $\tan \delta$  et de la constante diélectrique  $\epsilon_r$ .

Pour la mesure des paramètres spécifiques des huiles BORAC 22 et Aero-Shell, on a utilisé le condensateur à anneau de garde de type 2903 (figure 2.9) .

Schéma de principe

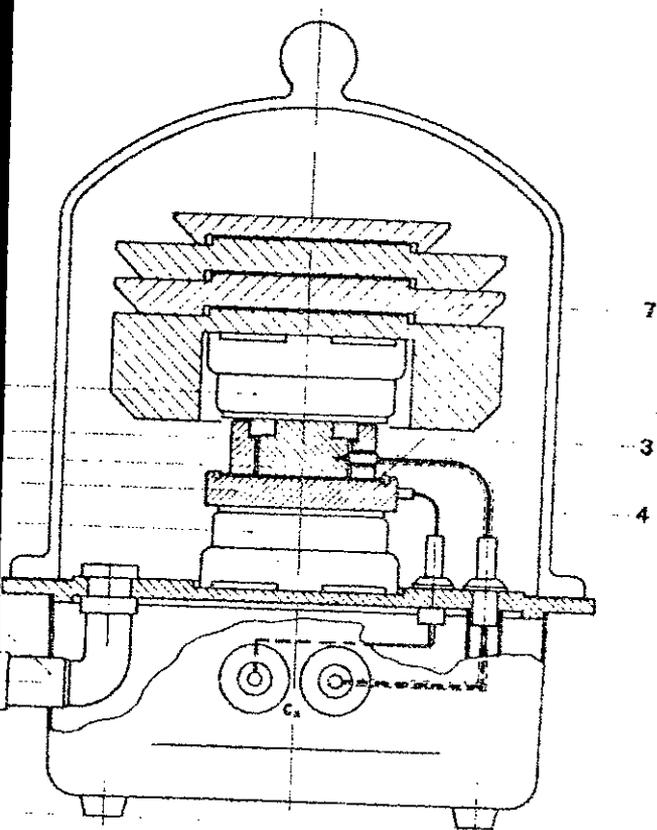


Légende

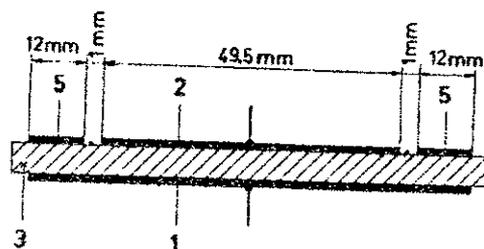
- 1 Electrode haute tension
- 2 Electrode indicatrice
- 3 Eprouvette d'huile
- 4 Prise de l'électrode indicatrice
- 5 Raccord pour pompe à vide
- 6 Anneau de garde
- 7 Canne de thermomètre avec cadran indicateur de température
- 8 Canne de thermomètre à résistance de platine
- 9 Chauffage

Figure 2.9 Condensateur de type 2903

De même, pour la mesure des caractéristiques spécifiques des éprouvettes en PVC et EPDM, on utilisé le condensateur à anneau de garde de type 2904 (figure 2.10).



Schéma de principe



Légende

- 1 Electrode haute tension à thermomètre à résistance de Pt
- 2 Electrode indicatrice   thermomètre à résistance de platine
- 3 Eprouvette
- 4 Prise pour la connexion de l'électrode indicatrice
- 5 Anneau de garde
- 6 Plaques chauffantes
- 7 Jeu de poids empilables
- 8 Raccord pour pompe à vide

Figure 2.10 : Condensateur de type 2904

La mesure de la longueur des streamers en fonction de l'amplitude ou de la durée d'application de la tension ou encore de l'épaisseur de l'échantillon de polymère est effectuée sur les traces du streamer (figures de Lichtenberg). En effet, en se propageant sur l'interface liquide-solide isolant, le streamer creuse sur l'échantillon et laisse alors ses traces. La longueur du streamer considérée est celle de la branche la plus longue. A l'aide d'une loupe graduée (appartenant au laboratoire de contrôle technique de l'ENICAB) nous pourrions alors mesurer la longueur de cette branche à 1 mm près.



### **III. PHENOMENES DE PROPAGATION DES STREAMERS**

#### **INTRODUCTION**

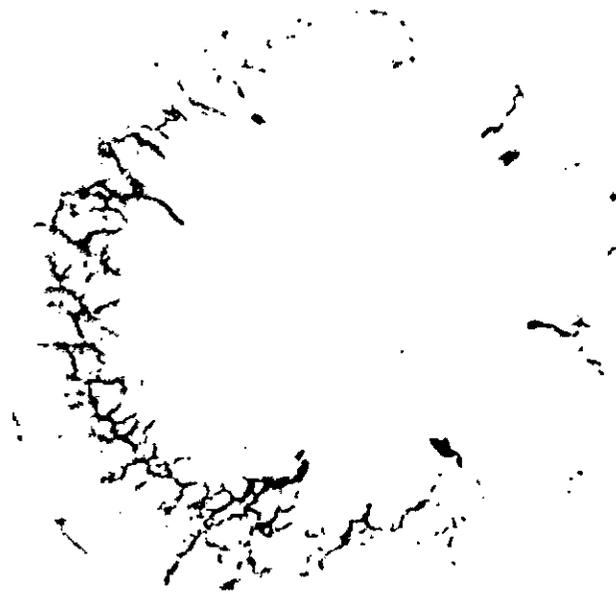
Nous présentons dans ce chapitre les caractéristiques électriques des échantillons de polymères ainsi que des huiles isolantes utilisés (facteur de pertes, permittivités relatives, capacité des échantillons). Par la suite, nous donnerons les résultats concernant la propagation des streamers à l'interface polymère/liquide en fonction de divers paramètres tels les dimensions et la nature du polymère et du liquide, la forme des électrodes, l'amplitude et la durée d'application de la tension. Nous discuterons également ces résultats .

Quand la tension appliquée aux électrodes donc au système liquide/polymère dépasse une certaine valeur seuil, on remarque l'apparition d'un streamer qui prend naissance au voisinage de l'électrode acérée et se propage radialement à l'interface liquide/solide.

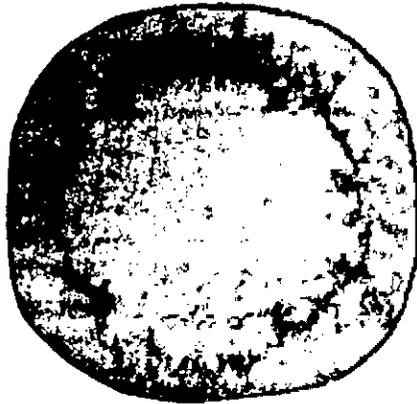
Lorsque la tension appliquée atteint environ les 2/3 de la valeur seuil de génération du streamer, on constate une turbulence importante du liquide; c'est le mouvement électrohydrodynamique.

Le streamer dans son état évolué est constitué de plusieurs branches présentant une certaine symétrie axiale

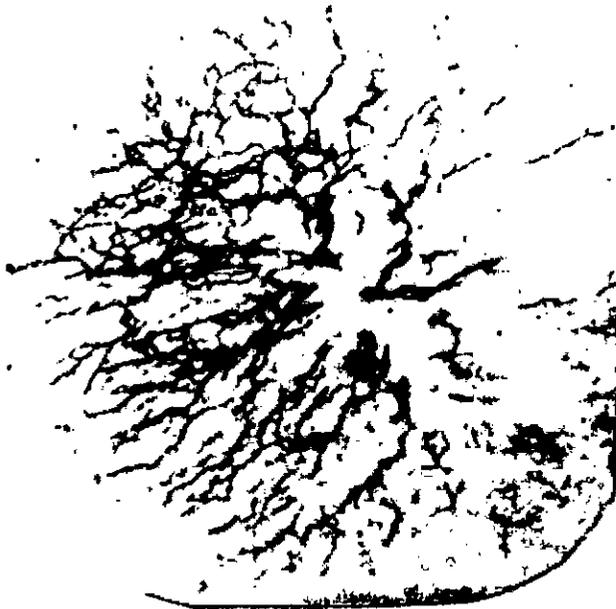
(figure 3.1) .



(a)



(b)



(c)

**Figure 3.1 : Forme des streamers à l'interface solide-liquide dans un système d'électrodes : (a) plan-plan  
(b) sphère-plan  
(c) pointe-plan**

### 3.1 CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES DES ECHANTILLONS

La mesure des paramètres spécifiques des échantillons PVC et EPDM a été effectuée à l'aide du condensateur à anneau de garde relié à un pont de Shering. Cet appareil permet de mesurer le facteur de pertes diélectriques  $tg\delta$ , constante diélectrique  $\epsilon_r$  ainsi que la capacité  $C$  de l'éprouvette .

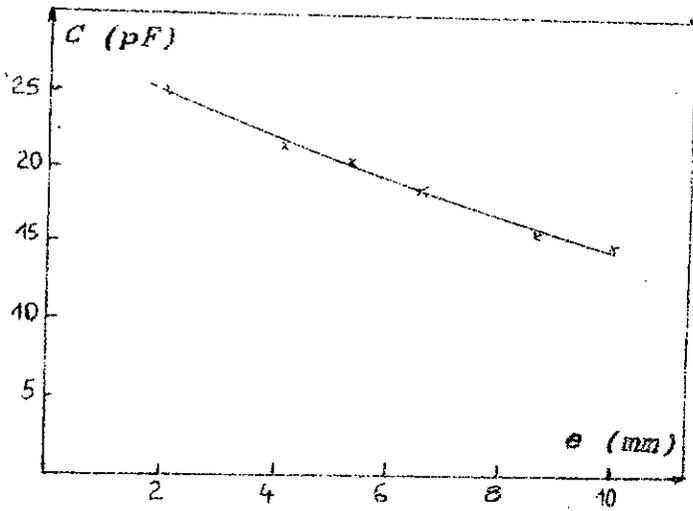
Pour le PVC, on a effectué des mesures à 20°C sous une tension de 500 V /norme CEI/ (Publication 1959). En fonction de l'épaisseur du PVC, nous avons obtenu les caractéristiques illustrées par la figure (3.2).

Nous remarquons que la permittivité relative et le facteur de pertes ne varient pas avec l'épaisseur de l'échantillon .

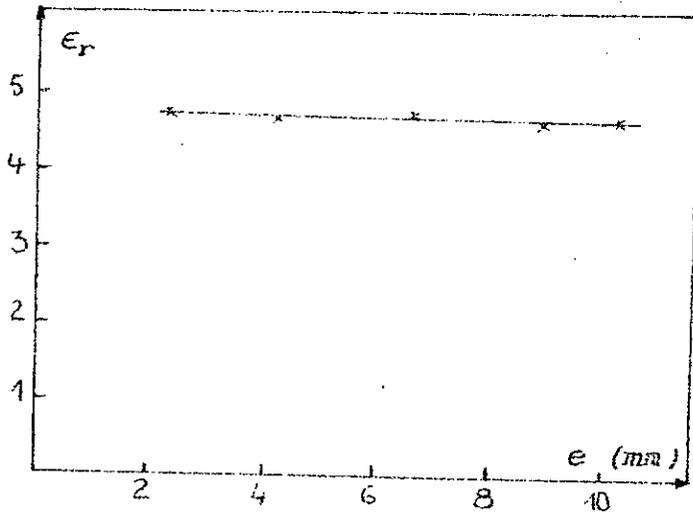
De même, la courbe des pertes diélectriques en fonction de la fréquence est représentée par la figure (3.3).

Enfin, la mesure des paramètres spécifiques de l'EPDM nous donnent les courbes de la figure (3.4) .

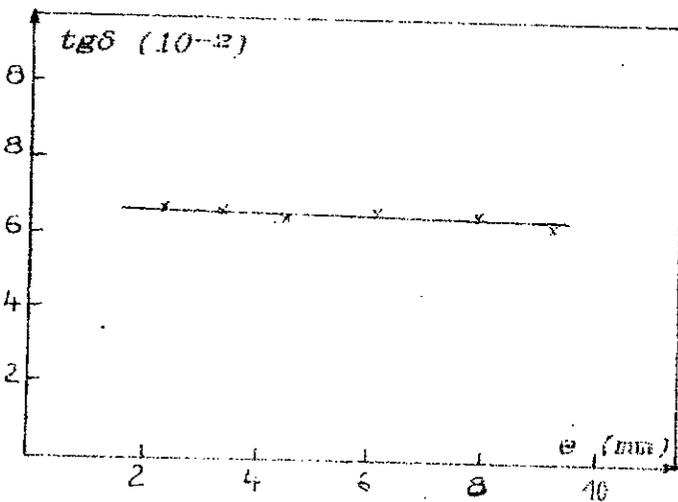
Pour une épaisseur donnée de l'EPDM, il se produit une légère augmentation de  $tg\delta$  avec la tension. Cependant, la capacité et la permittivité relative de l'échantillon d'EPDM restent constantes lorsqu'on fait varier la tension de 0 à 2000V .



(a)

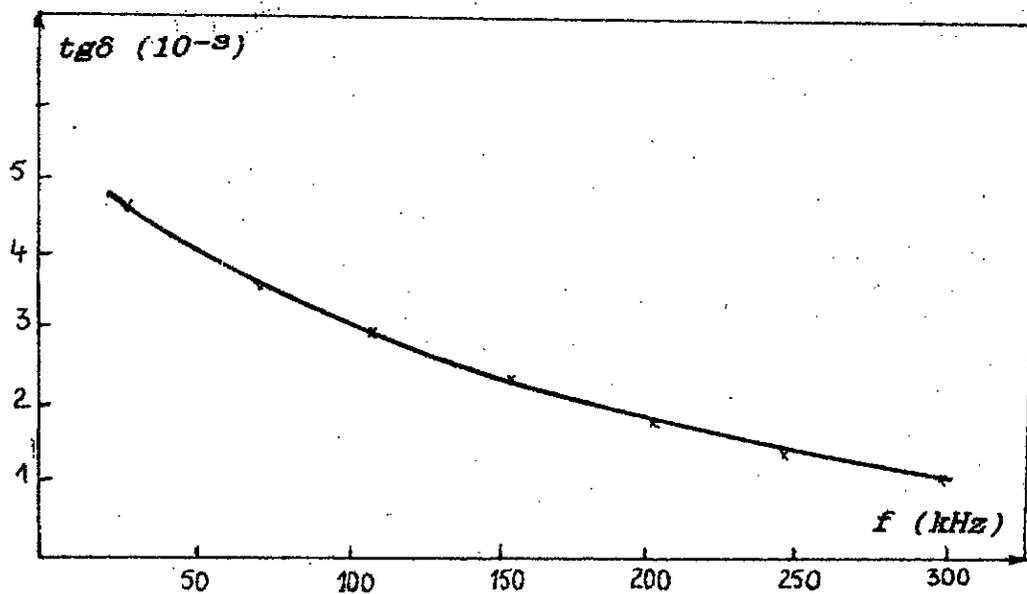


(b)



(c)

**Figure 3.2:** Caractéristiques du PVC à 500 V  
 En fonction de l'épaisseur  
 (a) Variation de la capacité  
 (b) Variation de la permittivité relative  
 (c) Variation du facteur de pertes



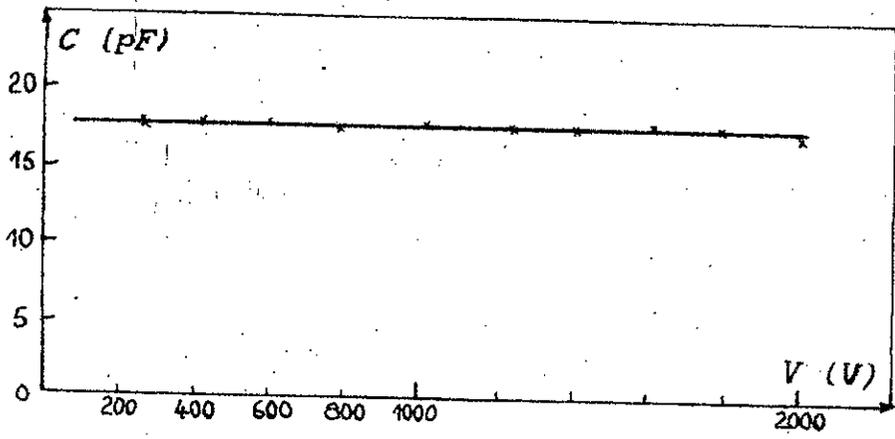
**Figure 3.3:** Variation du facteur de pertes du PVC en fonction de la fréquence

Nous remarquons que les pertes diminuent lorsque la fréquence augmente.

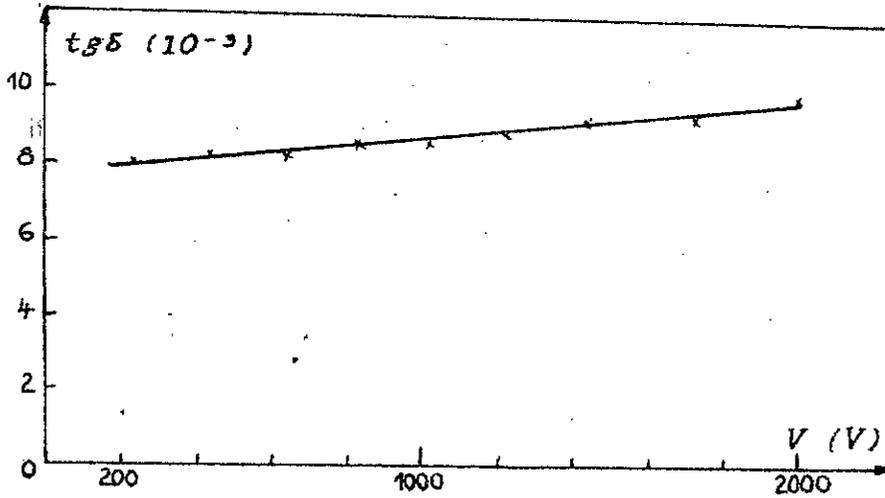
On retiendra donc que pour le PVC :

$$\epsilon_r = 4,8$$

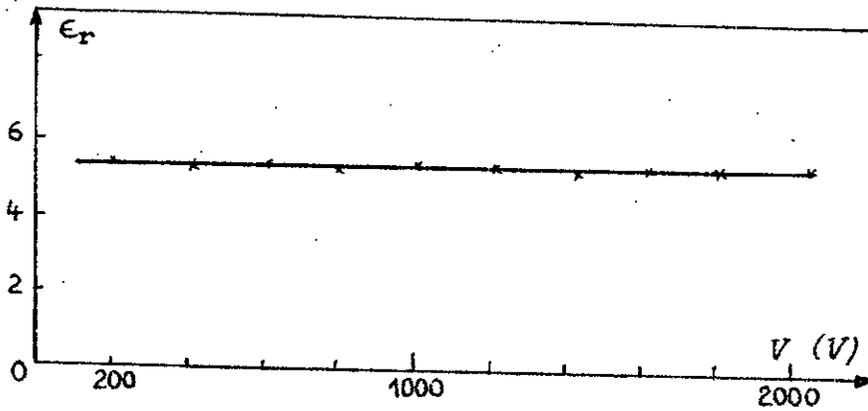
$$\text{tg}\delta = 6,8 \cdot 10^{-2} \text{ à } 50 \text{ Hz}$$



(a)



(b)



(c)

**Figure 3.4 : Caractéristiques de l'EPDM pour  $e = 5,8 \text{ mm}$   
 En fonction de la tension  
 (a) Variation de la capacité  
 (b) Variation du facteur de pertes  
 (c) Variation de la permittivité relative**

La figure (3.5) donne la variation du facteur de pertes diélectriques de la BORAC 22 en fonction de la tension ..

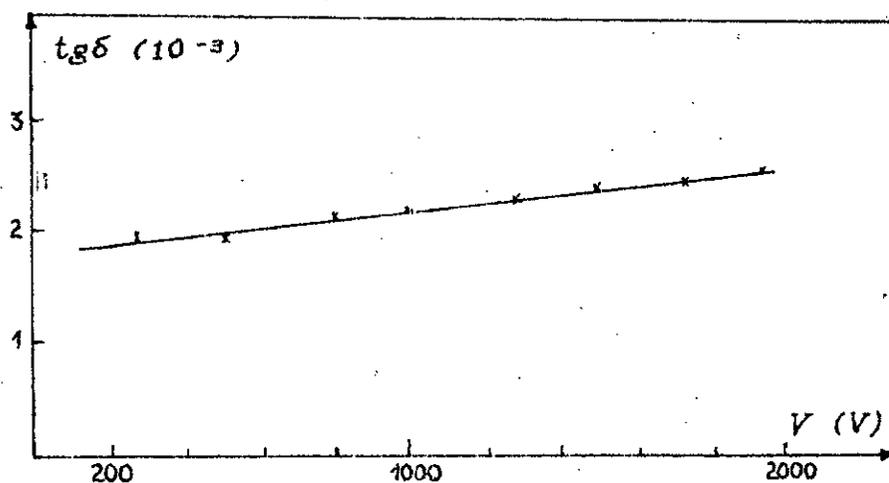


Figure 3.5 : Variation du facteur de pertes de la BORAC 22 en fonction de la tension

Pour ce qui est de l'huile Aero-Shell

$$tg\delta = 1,16 \cdot 10^{-3} \quad \text{à } 20 \text{ C et } 500 \text{ V (Norme CEI)}$$

Les rigidités diélectriques des huiles sont :

$$U = 30 \text{ kV/cm pour la BORAC 22}$$

$$U = 35 \text{ kV/cm pour l'Aero-Shell}$$

### 3.2: PROPAGATION DES STREAMERS

Les essais sont effectués sur des échantillons de PVC et d'EPDM, dont les rigidités diélectriques sont respectivement 17 kV/mm et 20 kV/mm immergés dans une huile isolante. Les huiles utilisées sont l'huile de transformateur de type BORAC 22 ( $\epsilon_r = 2.22$ ) et l'huile de commande hydraulique Aero-Shell ( $\epsilon_r = 2.32$ )

La longueur des streamers obtenue à partir des figures de Lichtenberg dépend de plusieurs paramètres et en particulier de l'épaisseur des échantillons en polymère, de la tension appliquée aux électrodes, de sa durée d'application et de la structure du polymère et de l'huile utilisée.

On appellera longueur finale du streamer, la longueur de la plus grande branche imprimée sur l'éprouvette en polymère, pour une durée d'application donnée de la tension .

L'électrode pointe utilisée dans tous les systèmes pointe-plan est celle dont le rayon de courbure est de 5  $\mu\text{m}$  .

### 3.2.1 Influence de la durée d'application de la tension

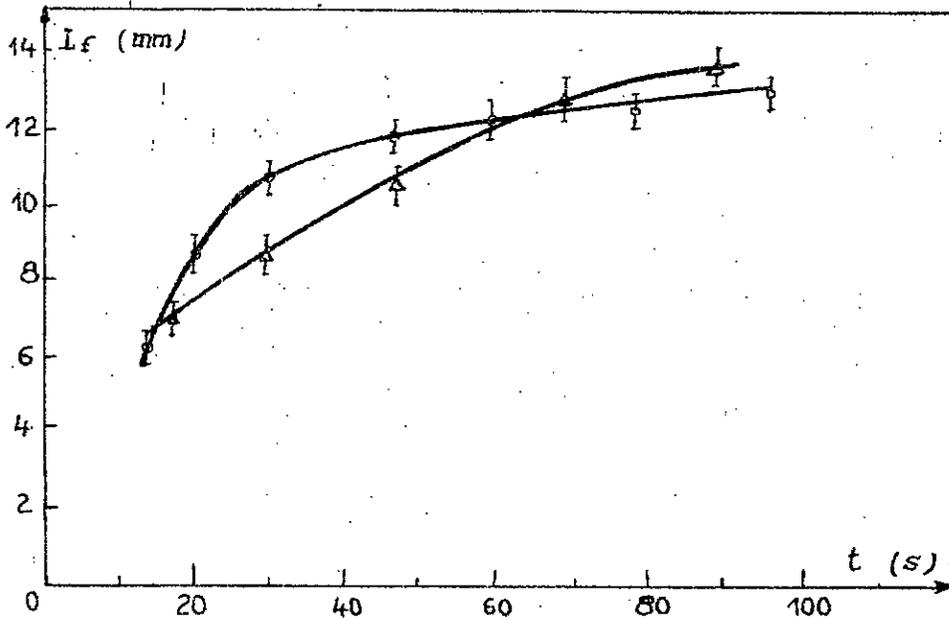
Les figures (3.6) et (3.7) donnent des exemples de variation de  $l_r$  en fonction de la durée d'application de la tension pour deux épaisseurs de PVC et deux tensions données avec les deux huiles isolantes en système pointe-plan et plan-plan .

Chaque point représente la moyenne de 5 mesures .

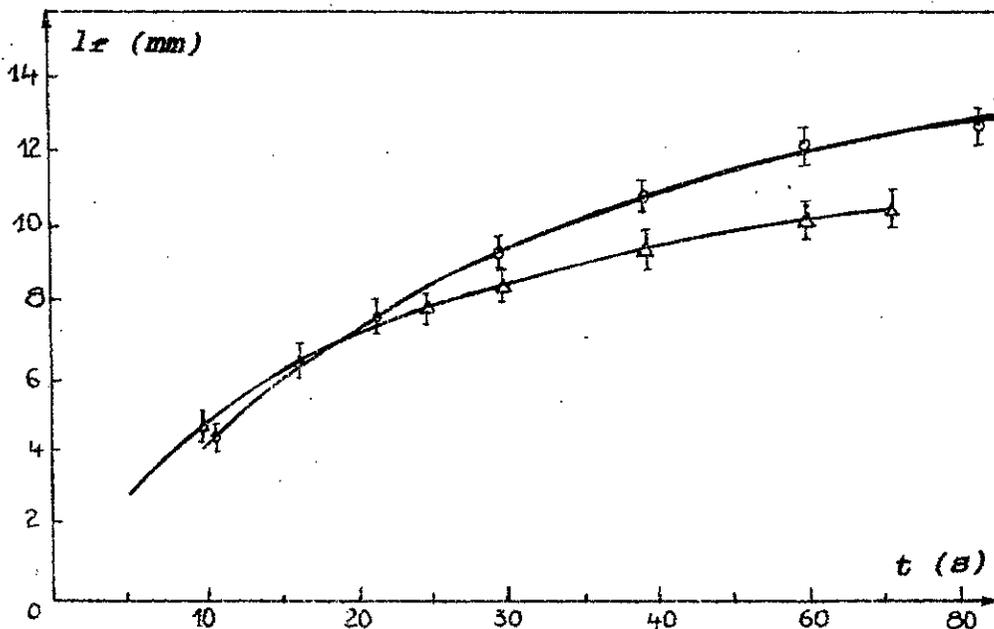
La durée d'application ( $t$ ) de la tension joue un rôle important dans les phénomènes de propagation du streamer et donc sur le contournement ou le claquage de l'isolant solide.

Pour une tension donnée, la longueur finale du streamer augmente avec le temps jusqu'à une certaine valeur limite  $l_r$ , cependant, au delà d'une certaine valeur  $t_c$  du temps le claquage peut intervenir : il y aura perforation .

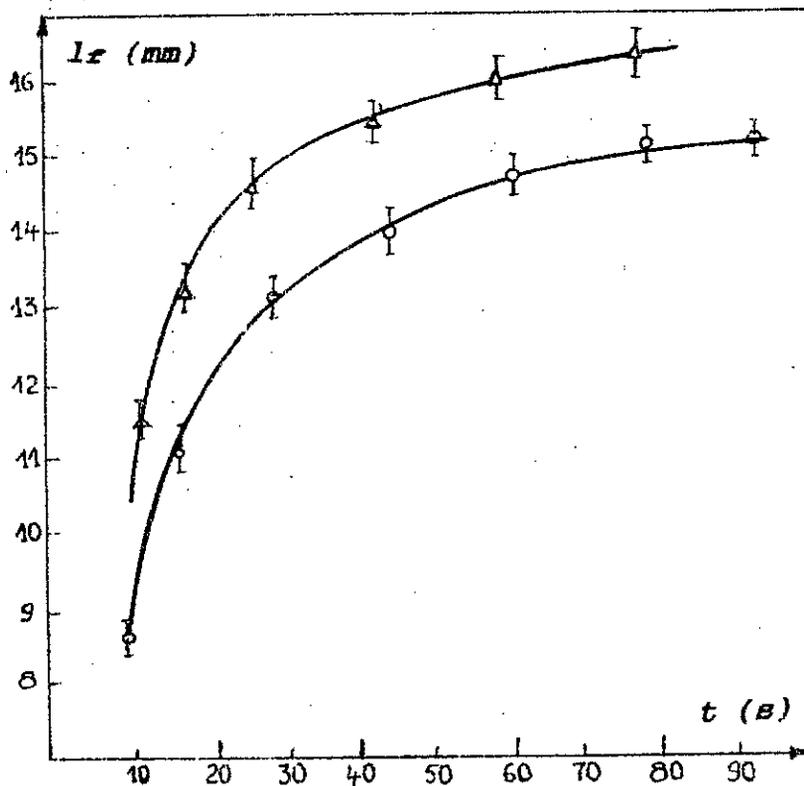
Nous retrouvons cette caractéristique en changeant l'éprouvette de PVC par l'EPDM pour des configurations d'électrodes différentes (figure 3.8)



**Figure 3.6:** Variation de la longueur du streamer en fonction de la durée d'application de la tension en système pointe-plan à  $U= 31$  kV et  $e= 2$  mm pour des interfaces : ○ PVC / BORAC 22  
 △ PVC / Aero-Shell



**Figure 3.7:** Variation de la longueur du streamer en fonction de la durée d'application de la tension en système plan-plan à  $U= 46$  kV et  $e= 4,35$  mm pour des interfaces ○ PVC / BORAC 22  
 △ PVC / Aero-Shell



**Figure 3.8:** Variation de la longueur du streamer en fonction de la durée d'application de la tension à l'interface EPDM/BORAC 22 à  $U= 50$  kV et  $e=5,8$  mm pour un système d'électrodes:  $\Delta$  pointe-plan  
 $\circ$  plan-plan

Le diamètre des éprouvettes étant maintenu constant, la longueur des streamers, pour une tension d'essai et une forme d'électrodes données, dépendrait surtout de l'épaisseur de l'isolant solide et des permittivités des différents milieux. A cet effet, nous avons jugé qu'une durée d'application de tension de l'ordre de 20 secondes est suffisante pour notre étude .

Cette étude concerne l'influence de la tension, de l'épaisseur de l'éprouvette, et du rayon de courbure des électrodes pointes.

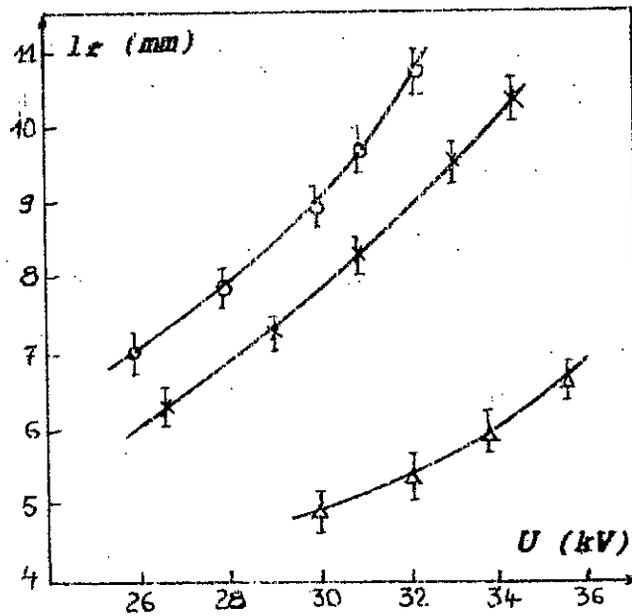
### 3.2.2 Influence de la tension et du système d'électrodes.

Les figures (3.9) et (3.10) montrent la variation de la longueur finale du streamer ( $l_r$ ) en fonction de la tension appliquée aux électrodes, durant 20 secondes, pour une épaisseur ( $e$ ) donnée de l'échantillon dans différents systèmes d'électrodes. Chaque point représente la moyenne de 5 mesures.

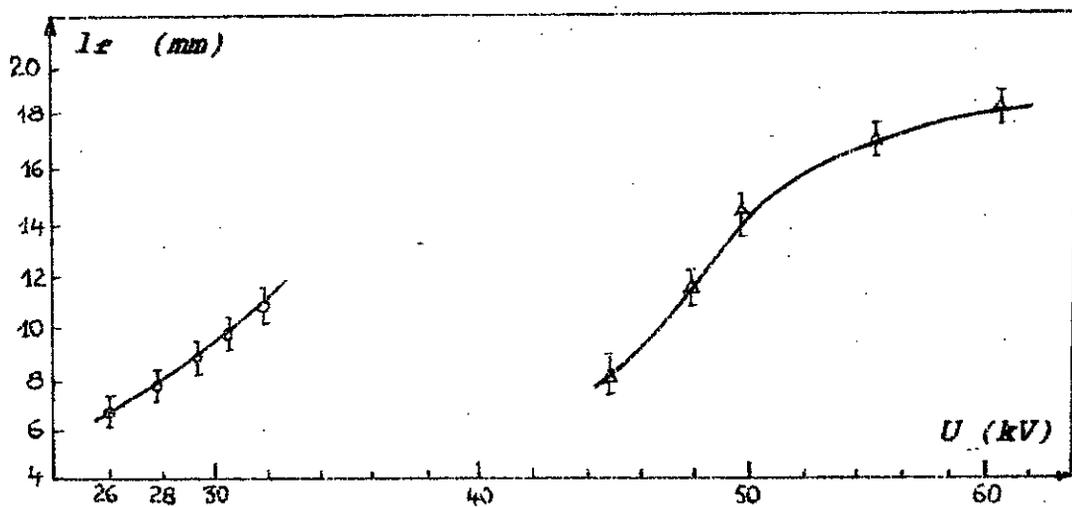
Nous remarquons que la longueur  $l_r$  croît de façon plus que proportionnelle avec la tension, quel que soit le système d'électrodes. Une telle variation a été observée également par OHGAKI et TSUNODA [22], sous tension impulsionnelle avec une interface huile de paraffine-film acrylique.

D'autre part, pour une tension  $U$  et une même épaisseur de l'isolant solide, la longueur du streamer dans le PVC est plus importante pour un système d'électrodes pointe-plan que pour un système sphère-plan, et elle est la moins importante pour un système plan-plan ( figure 3.9 ) :

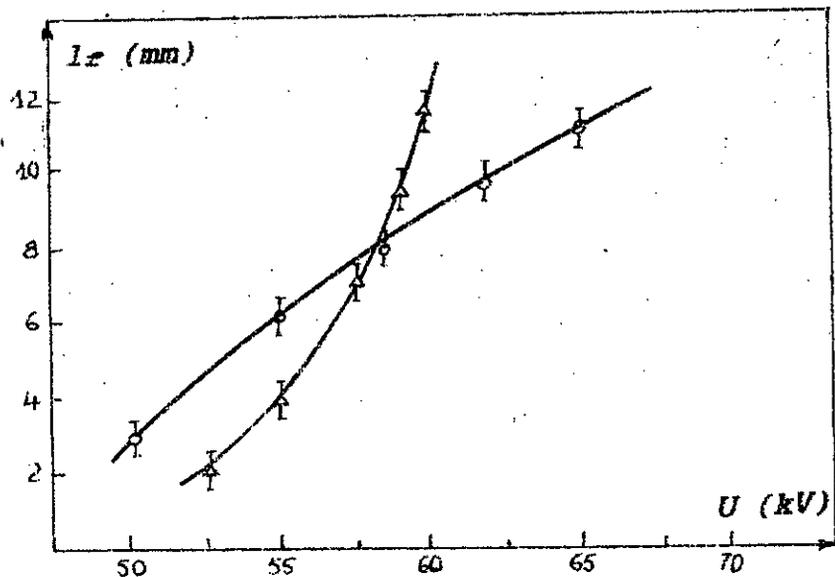
Pour  $U = 32$  kV et  $e = 2$  mm ,  $l_r = 5.5$  mm en système plan-plan et  $l_r = 8.5$  mm en sphère-plan alors que  $l_r = 11$  mm en système pointe-plan .



**Figure 3.9 :** Variation de la longueur finale du streamer en fonction de tension appliquée, à l'interface PVC/BORAC 22 pour une épaisseur de PVC de 2mm, en système d'électrodes: ○ pointe - plan  
× sphère - plan  
△ plan - plan



**Figure 3.10:** Variation de la longueur finale du streamer en fonction de la tension pour un système pointe - plan à l'interface PVC / BORAC 22 avec : ○  $e = 2$  mm  
△  $e = 9$  mm



**Figure 3.11** : Variation de la longueur finale du streamer en fonction de la tension à l'interface EPDM / BORAC 22 avec  $e = 5.8$  mm pour un système d'électrodes :  $\Delta$  plan-plan  
 $\circ$  pointe-plan

Dans le cas de l'EPDM, on remarque pour une épaisseur de 5.8 mm l'existence de deux zones ( figure 3.11 ) :

- a) Pour  $U < 58$  kV , le comportement est identique à celui du PVC pour une épaisseur de 2 mm. En effet, pour  $U = 58$  kV ,  $l_f$  est de 4 mm avec un système plan-plan et 7 mm dans le cas du système pointe-plan .
- b) Pour  $U > 58$  kV , le comportement est inversé. Pour une tension de 60 kV,  $l_f = 12$  mm pour le système plan-plan alors que  $l_f = 9$  mm en pointe-plan .

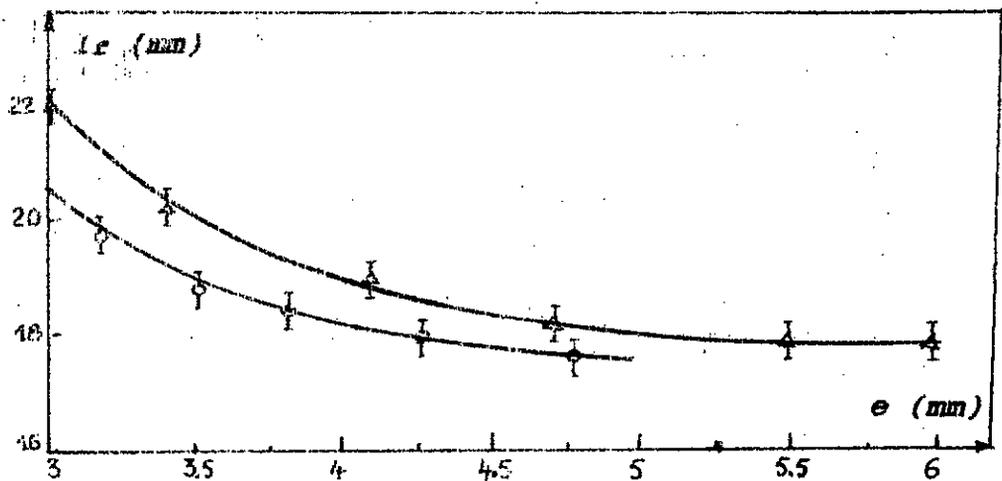
### 3.2.3 Influence de l'épaisseur de l'échantillon polymère

La propagation du streamer dépend également de l'épaisseur des échantillons de polymère : Pour une tension donnée,  $l_r$  est d'autant plus faible que  $(e)$  est grande, quelle que soit la géométrie des électrodes .

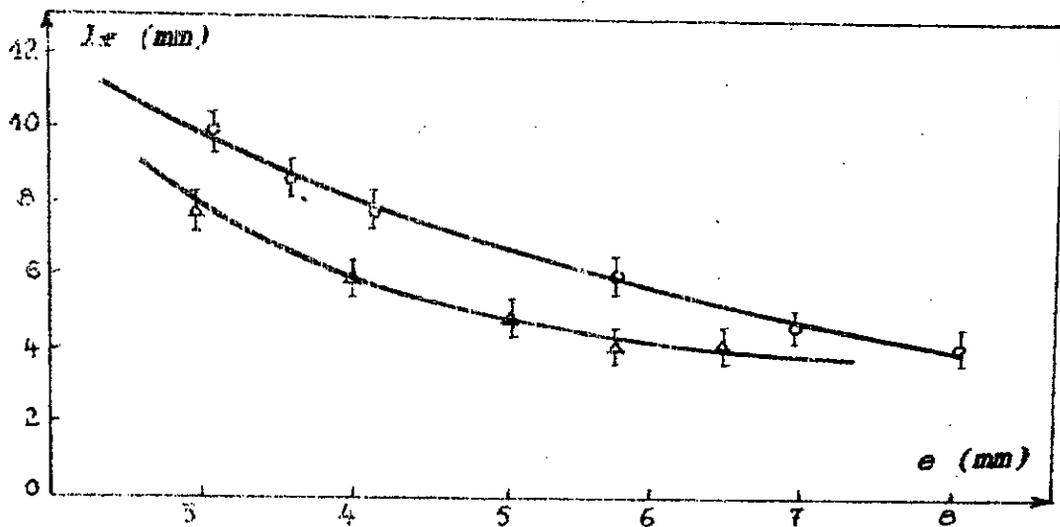
La figure (3.12) donne un exemple de variation de  $l_r$  en fonction de  $(e)$  sur l'interface PVC / BORAC 22.

Comme on peut le remarquer sur cette figure, pour une épaisseur donnée de l'échantillon, la longueur du streamer  $l_r$  est toujours plus élevée en pointe-plan qu'en sphère-plan .

Des résultats similaires ont été également obtenus avec des échantillons d'EPDM (figure 3.13).



**Figure 3.12 :** Variation de la longueur du streamer en fonction de l'épaisseur de l'échantillon PVC, pour un interface PVC/BORAC 22 à  $U = 61$  kV avec un système d'électrodes :  $\Delta$  pointe-plan  $\circ$  sphère-plan



**Figure 3.13 :** Variation de la longueur du streamer en fonction de l'épaisseur de l'échantillon PVC, pour un interface EPDM/Aero-Shell à  $U = 55$  kV avec un système d'électrodes  $\circ$  pointe-plan  $\Delta$  sphère-plan

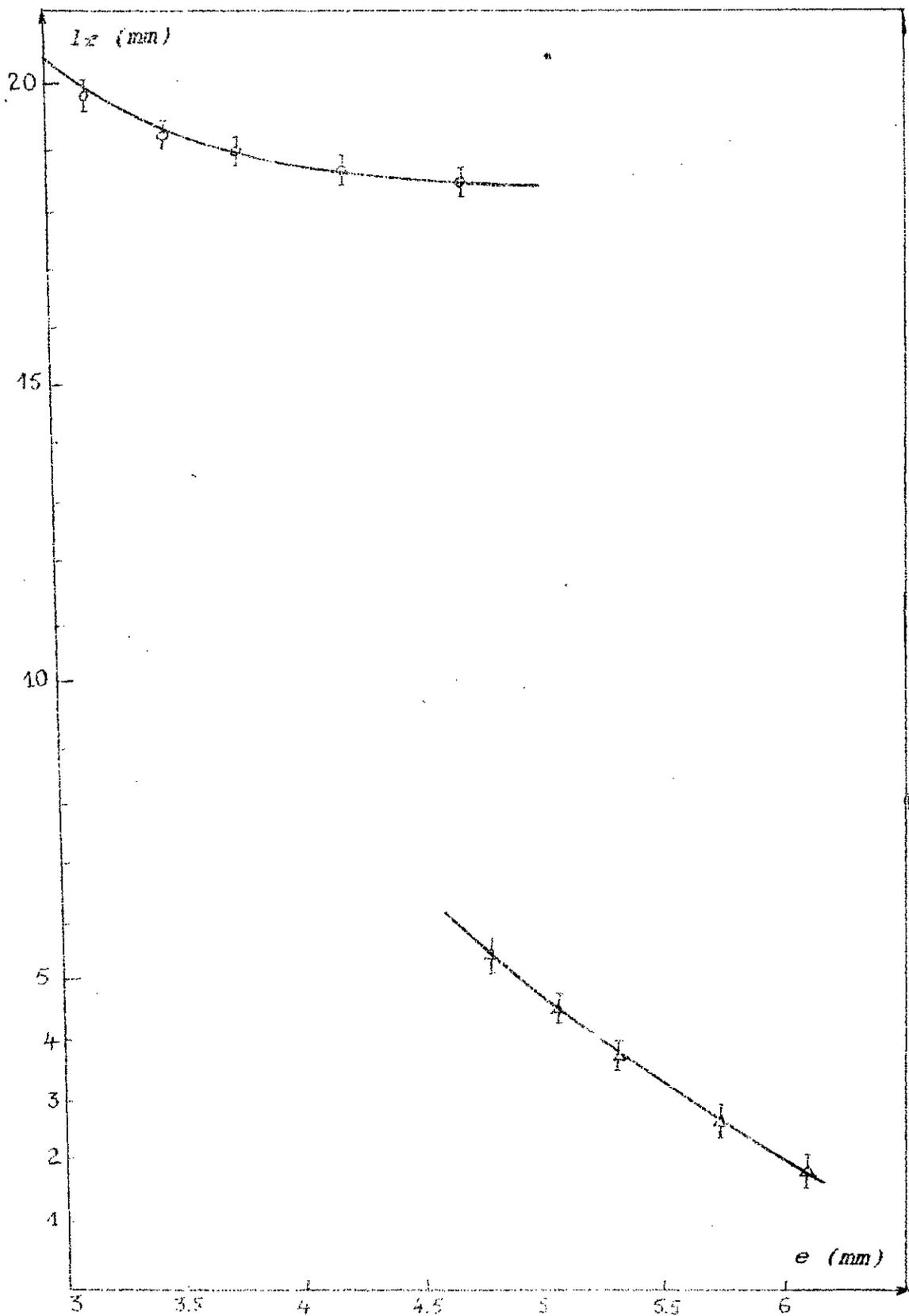


Figure 3.14 : Variation de la longueur finale du streamer en fonction de l'épaisseur du PVC à  $U = 61$  kV, en système sphère-plan, pour des interfaces  
 ○ PVC / EORAC 22  
 △ PVC / Aero-Shell

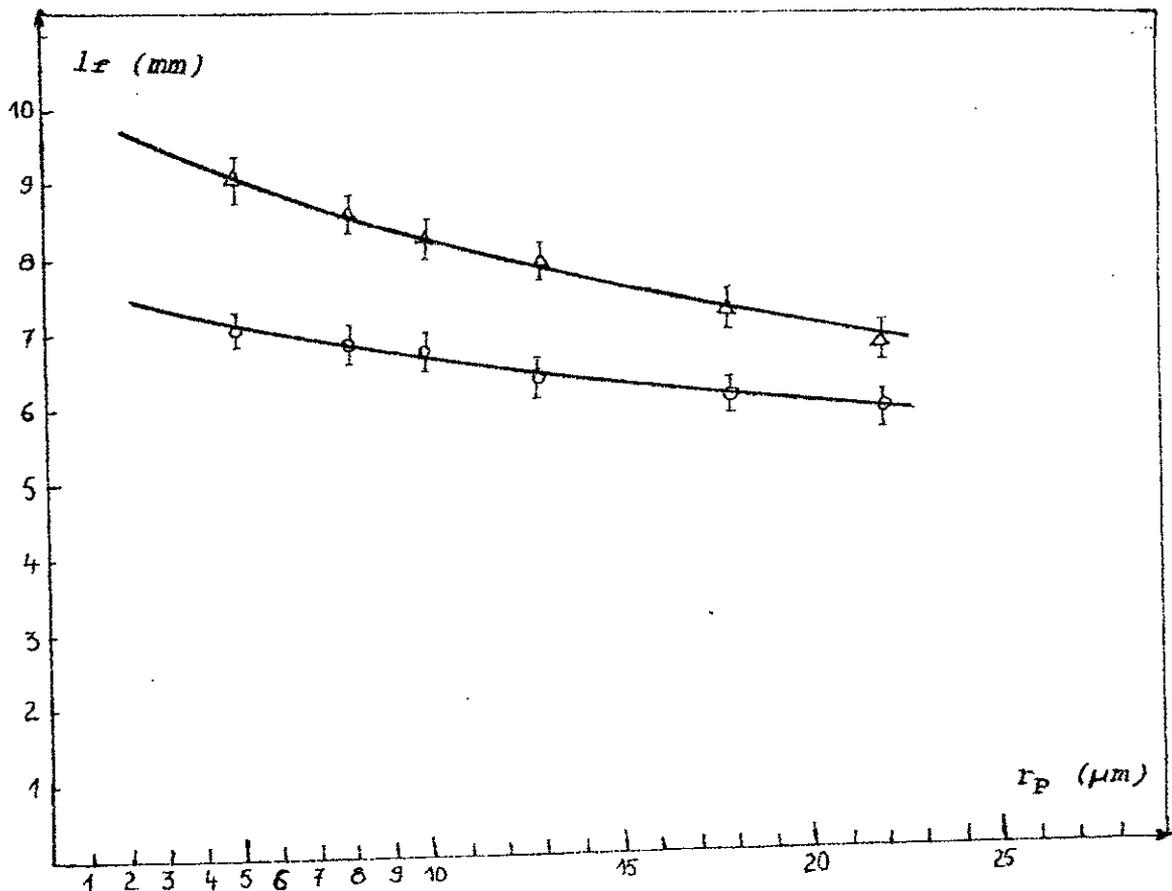
#### 3.2.4 Influence de la structure du liquide

Le liquide dans lequel sont immergés les échantillons a une influence très importante sur la vitesse de propagation des streamers. En effet, comme on peut le remarquer sur la figure (3.14), pour une tension de 61 kV, la vitesse de propagation est d'environ 4 fois supérieure à l'interface PVC/ l'huile de transformateur BORAC 22 qu'à l'interface PVC/ l'huile Aero-Shell. Ceci est dû à la complexité de la structure moléculaire de l'huile de transformateur, et surtout du fait que l'huile Aero-Shell est plus rigide que la Borac 22 .

D'ailleurs la vitesse de propagation des streamers dans l'huile de transformateur seule est supérieure au km/s, ce qui expliquerait en partie la variation  $l_r = f(e)$  pour l'interface PVC / BORAC 22 .

#### 3.2.5 Influence du rayon de courbure de l'électrode pointe

Le rayon de courbure de la pointe joue aussi un rôle dans la l'évolution de la longueur du streamer. En effet, pour une tension donnée et une même épaisseur de l'éprouvette en polymère, nous remarquons que plus la pointe est acérée, plus la longueur finale du streamer croît (figure 3.15) .



**Figure 3.15:** Variation de la longueur du streamer en fonction du rayon de courbure de l'électrode pointe à  $U = 30 \text{ kV}$  et  $e = 2 \text{ mm}$

$\Delta$  PVC / Huile BORAC 22

$\circ$  PVC / Huile Aero-Shell

Nous remarquons toutefois que la différence entre les longueurs finales n'est pas très significative, ceci est dû au fait que la variation du rayon de courbure des pointes n'est pas trop grande, c'est à dire de  $3 \mu\text{m}$  à  $22 \mu\text{m}$  seulement .

Il ressort de ces figures que la composante tangentielle du champ électrique  $E$  a une influence remarquable sur la propagation des streamers; la composante normale de  $E$  est très faible dans le cas du système plan-plan.

Dans le cas du système plan-plan, le champ électrique qui intervient le plus, c'est celui régnant aux bords des électrodes planes. Le fait que la permittivité du liquide isolant (2.22 ou 2.32) soit faible par rapport à celle du solide (4.8) rend le volume de liquide entre les bords de l'électrode plane et l'échantillon de polymère (figure 3.16) plus contraint qu'ailleurs .



Figure 3.16

Malgré la faible valeur de la composante normale du champ électrique  $E$  en géométrie plan-plan, la zone faible est assimilable à un système pointe-plan, c'est pour cela que la longueur  $l_r$  du streamer est à peine supérieure en pointe-plan qu'en plan-plan pour une durée d'application donnée de la tension (figure 3.8).

Remarquons que nous ne pouvons déduire de cette caractéristique  $l_r=f(t)$ , ni la vitesse de propagation du streamer, ni sa polarité puisque les durées d'application de la tension sont supérieures à la durée d'une alternance .

Il ressort des résultats expérimentaux que le champ électrique auquel sont soumis les échantillons joue un rôle important dans les phénomènes de propagation des streamers. D'autre part, c'est la composante tangentielle du champ électrique au niveau de l'électrode acérée qui joue le rôle le plus important dans le phénomène de génération des streamers .

La propagation du streamer s'effectuera tant que le champ électrique entre électrodes n'a pas atteint la valeur critique correspondant à la rigidité diélectrique de l'isolant solide.

## CONCLUSION

Il ressort de notre étude que la structure du liquide et du solide ainsi que son épaisseur ont une influence significative sur la propagation des streamers à l'interface liquide-solide .  
la longueur finale du streamer est d'autant plus importante que l'épaisseur de l'échantillon solide est faible.

La propagation est plus rapide avec l'huile BORAC 22 qu'avec l'huile Aero-Shell, ceci serait dû au fait que la vitesse des streamers dans la BORAC 22 est plus importante que dans l'autre huile. Les ordres de grandeur des vitesses de propagation des streamers à l'interface (2.5 kV) sont identiques à celles obtenues dans le liquide seul.

De même que, la longueur finale est d'autant plus élevée que la tension ou/et sa durée d'application sont importantes .

D'autre part, dans un système divergent, plus le rayon de courbure de l'électrode acérée est faible, plus la longueur finale du streamer est importante. Il apparait donc que la composante tangentielle du champ électrique appliqué à l'échantillon joue un rôle important dans la propagation.

Pour mieux comprendre les mécanismes physico-chimiques qui interviennent lors de la propagation des streamers, il serait utile d'analyser le liquide avant et après les essais (analyse chroma-

tographique); ce qui permettrait de connaître la nature et la quantité de matière arrachée par les décharges, et donc leur niveau d'énergie.

## B I B L I O G R A P H I E

- [1] R. TOBAZEON :  
Préclaquage et claquage des diélectriques liquides  
Technique de l'Ingénieur D226 pp 1-16 Sept 1987 .
- [2] N. FELICI :  
High-field conduction in dielectric liquid revisited  
IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. EI 20 n°2  
pp 233-237 Avril 1985 .
- [3] N. FELICI :  
Physique de la matière condensée . Conduction des  
diélectriques liquides sous haute tension et régime de  
la double couche aux électrodes .
- [4] A. NIKURADSE :  
Das flüssige dielektrum. pp 134-152, Springer ,Berlin 1943
- [5] L. ONSAGER :  
Journal of chemical Physics. T2 pp 599 , 1934
- [6] A. SAAD :  
Conduction électrique superficielle et volumique de films de  
polymères au contact de liquides isolants .  
Thèse d'état Es sciences physiques, Grenoble 1986 .
- [7] S. OCHIAI, H. IWASAKI, T. MIZUTANI and M. IEDA :  
On electrical conduction of oil/polymer composite systems.  
Proceeding of the 3<sup>rd</sup> International Conference on conduction  
and Breakdown in Solid Dielectrics. July 1989
- [8] T. R. JOW :  
The effect of liquid impregnants on solid polymeric  
dielectrics. CEIDP, pp 636-642 October 1990
- [9] H. R. KRUYT :  
Colloid Science, Vol 1 Elsevier Publishing Company N.Y
- [10] C. G. GARTON :  
Proc. Inst. Elect. Eng. Vol 88 , p103 1941

- [11] **N. FELICI** :  
The investigations of solid dielectrics and methods of their testing. Prace Naukowe Instytutu Podskaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii , Politechniki Wroclalawskiej n°16 1977.
- [12] **PHILIPPE ROBERT** :  
Traité d'électricité, Matériaux de l'électrotechnique  
Volume II. Edition Georgi 1979 .
- [13] **FELICI, GARTNER and TOBAZEON** :  
Physical factors affecting the behavior of systems impregnated with liquids of high permittivity Dielectric Materials Measurements and Application, Conf. Publ. n°67 July 1970 .
- [14] **GARTNER et TOBAZEON** :  
Pertes non linéaires dans les diélectriques composites.  
C.R. Acad. Sc.274 p 1206 (1972).
- [15] **ROBERT FOURNIER** :  
Diélectriques, Bases théoriques .  
Technique de l'Ingénieur D 213 , pp 1-18 , Juin 1986
- [16] **A. BEROUAL** :  
Phénomènes de propagation et de génération des streamers dans les diélectriques liquides en géométrie pointe-plan sous créneau de tension.  
Thèse d'état Ea Sciences Physiques Grenoble 1987
- [17] **R.J TAYLOR** :  
The flashover of a solid/liquid interface.  
Dielectric Materials, Measurements and application,  
Conf. Publ n°129, July 1975.
- [18] **K.WESCHLER and M.RICCITIELLO** :  
Electric breakdown of parallel solid and liquid dielectric system. Trans. AIEE 1960, 80, pp 365-369 .
- [19] **L.J FRISCO and J.J CHAPMAN** :  
The flashover strength of solid dielectrics.  
Trans. AIEE 1956, 75, pp 75-83 .

- [20] **W. HAUSCHILD :**  
*The flashover of inhomogeneous insulating arrangements under transformer oil at switching voltages .*  
*Elektrie 1971, pp 177-180 .*
- [21] **S.R TAYLOR :**  
*Assessing the moisture barrier properties of polymeric coatings using electrical and electrochemical methods .*  
*IEEE Trans.on Elect.Insul. Vol 24 n°5 Oct 1989 .*
- [22] **S.OHGAKI and Y.TSUNODA :**  
*A Study of the positive streamer growth under surface discharge configuration in liquid paraffin.*  
*IEEE Trans. on Elect.Insul. Vol EI.19 n°6 Dec 1984 .*
- [24] **ATTEN and SAKER :**  
*Streamer propagation over a liquid-solid interface*  
*10<sup>th</sup> International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquid , Grenoble Sept.1990*
- [25] **A.BERROUAL :**  
*Propagation des streamers dans les diélectriques liquides .*  
*C.R. Acad. Sc. Paris T 303 série II n°4 1986 .*
- [26] **Z.KRASUCKI :**  
*Breakdown of commercial liquid and liquid-solid dielectrics.*  
*Proc. Inst. elect Eng 109 , 1962.*
- [27] **M.G DANIKAS and A.J PEARMAIN :**  
*The effect of partial discharges on a uniaxially orientated polyethylene/oil insulation system .*  
*Dielectric Materials, measurements and application ,*  
*Sept 1984*
- [28] **I.MEGAHED, B.C MANSFIELD and R.E WOOTEN :**  
*Detection and measurement of discharges in cavities in solid dielectrics .*  
*Proc IEE 114 , pp 1822-1824 , 1967.*
- [29] **G.GARCIA and B.FALLOU :**  
*Equipment for the energy measurement of partial discharges.*  
*Proc.1<sup>st</sup> Intern. Conf. on conduction and breakdown in solid dielectrics. pp 275-281 July 1983 .*

[30] Mode d'utilisation des spintermètres semi-automatiques  
"BAUR" Document ENICAB .

[31] TROTIGNON, VERDU, PIPERAUD et DOBRACZYNSKI :  
Précis de matières plastiques - Structures, propriétés, mise  
en oeuvre et normalisation. AFNOR .

[32] J.G ANDERSON and T.W LIAO :  
The propagation mechanism of impulse creepage discharges  
over oil-immersed surfaces.  
AIEE Trans.pt.1, n°18 pp 218-226 ,1955 .

[33] TETTEX AG INSTRUMENTS  
Condensateurs à anneau de garde de type 2903 et 2904  
Description et mode d'emploi. Document ENICAB