

وزارة التربية الوطنية
Ministère de l'Education Nationale

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة قطبين
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE DE LA PROPAGATION DES STREAMERS
AUX INTERFACES LIQUIDES ISOLANTS/POLYMERES SOLIDES
SOUS TENSION ALTERNATIVE 50 Hz

Proposé et Dirigé par :

— Mr. A. BOUBAKEUR

Etudié par :

— A. M. MERAD

Promotion 1993

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التربية الوطنية
Ministère de l'Education Nationale

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Debut du projet

SUJET

ETUDE DE LA PROPAGATION DES STREAMERS
AUX INTERFACES LIQUIDES ISOLANTS/POLYMERES SOLIDES
SOUS TENSION ALTERNATIVE 50 Hz

Proposé et Dirigé par :

— Mr. A. BOUBAKEUR

Etudié par :

— A. M. MERAD

Promotion 1993

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Electrique

PROJET DE FIN D'ETUDES

ETUDE DE LA PROPAGATION DES STREAMERS

AUX INTERFACES

DIELECTRIQUES LIQUIDES / POLYMERES SOLIDES

SOUS TENSION ALTERNATIVE 50 Hz

Présenté par :

A.M.MERAD

Proposé et dirigé par :

Mr. A.BOUBAKEUR

Promotion 1993

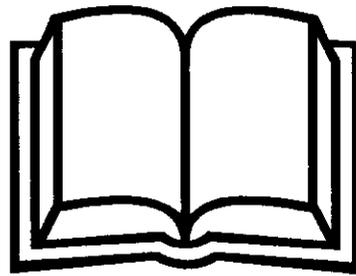


*Et Rose , elle a vécu ce que vivent les Roses
l'Espace d'un Matin*

A mes très chers parents

A mes très chers Lies et Djamel

A ta mémoire Djallal



*Mes remerciements les plus sincères s'adressent à Monsieur A. Boubakeur ,
Docteur es sciences techniques , chargé de cours à l'Ecole Nationale Polytechnique ,
pour avoir proposé et dirigé ce travail , en sachant toujours donner la meilleure
mesure pour mon orientation et l'accomplissement de ce travail .*

*Je n'oublierai certainement pas d'exprimer toute ma gratitude à Hamid et Samir ,
de la section Contrôle Câble de l'ENICAB , qui n'ont cessé de me consacrer patience
et soutien tout au long des essais que j'ai effectué à l' ENICAB , ainsi que pour leurs
précieux conseils .*

*Je remercie d'un autre coté les membres du jury , pour avoir bien voulu estimer
ce travail ainsi que pour m'avoir fait l'honneur de leur présence à ma soutenance .*

*Que Djamel Bellani trouve là l'expression de ma sincère reconnaissance et toute
ma sympathie , merci pour tout .*

*Que Messieurs R.Khaili , chef de département Assurance et Qualité de l'ENICAB
et LEBID , du laboratoire de chimie de SONELGAZ - El Hamma , trouvent ici
l'expression de ma sincère reconnaissance , pour s'être empressés de mettre à ma
disposition produits et matériels , nécessaires à mon étude .*

*A tout ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration et à l'accomplis-
sment de ce travail , plus particulièrement le personnel du département Assurance
et Qualité de l'ENICAB .*

<u>SOMMAIRE</u>	page
<u>Introduction .</u>	1
<u>Chapitre 1 : Rappels sur les diélectriques .</u>	4
1.1 : Phénomènes de conduction dans les diélectriques liquides .	4
1.1.1 : La conduction aux champs électriques élevés .	4
1.1.2 : Emission d'électrons à la cathode .	6
1.1.3 : Courant dû au mouvement des particules .	6
1.1.4 : Phénomène électrohydrodynamique .	7
1.1.5 : Théorie de Watson et Sharbaugh .	8
1.1.6 : Théorie des bulles .	8
1.2 : Phénomènes de conduction dans les diélectriques solides .	11
1.2.1 : Mécanismes de rupture diélectrique des isolants solides .	11
1.2.2 : Rupture intrinsèque des isolants solides et paramètres influents .	13
1.2.3 : Rupture diélectrique due au " volume libre " des polymères .	18
1.2.4 : Mécanisme électromécanique de rupture diélectrique .	19
1.2.5 : Mécanisme thermique de rupture diélectrique .	19
1.3 : Phénomène d'interface .	21
1.3.1 : Mise en évidence d'un effet d'interface .	22
1.3.2 : Couche diffuse et conductivité superficielle .	23
1.3.3 : Conduction dans une isolation mixte .	25
1.4 : Décharges à l'interface liquide / solide :	27
- Phénomène des streamers -	
1.4.1 : Disposition parallèle des isolants .	28
1.4.2 : Disposition des isolants perpendiculaire au champ électrique .	30
1.5 : Phénomènes de polarisation .	34
1.5.1 : Moment dipolaire et polarisation des diélectriques .	36

1.5.2 : Polarisation électronique .	37
1.5.3 : Polarisation ionique .	37
1.5.4 : Polarisation par orientation .	38
1.5.5 : Polarisation interfaciale .	38

Chapitre 2 : Polymères et Polymérisation .

2.1 : Classification des polymères .	43
2.1.1 : Origines des polymères .	43
2.1.2 : Structure chimique des motifs .	44
2.1.3 : Géométrie de la macromolécule .	44
2.1.4 : Type d'architecture ou d'isomérisation du polymère .	47
2.1.5 : Type de polymérisation utilisé .	49
2.2 : Procédés de polymérisation .	50
2.2.1 : Polymérisation en masse .	50
2.2.2 : Polymérisation en solution .	51
2.2.3 : Polymérisation en suspension .	51
2.2.4 : Polymérisation en émulsion .	51
2.3 : Caractéristiques des polymères utilisés .	52
2.3.1 : PVC .	52
2.3.2 : EPDM .	53

Chapitre 3 : Etude expérimentale .

3.1 : Dispositifs et techniques de mesure .	55
3.2 : Etude de la propagation des streamers à l'interface (liquides / solides) isolants sous tension alternative 50 Hz .	58
3.2.1 : Influence de la durée d'application de la tension et de la forme des électrodes .	
3.2.2 : Influence de la tension et de la géométrie des électrodes sur la longueur finale du streamer .	

3.2.3 : Influence de la durée d'application de la tension sur la longueur finale du streamer .

3.2.4 : Influence de l'état de pureté du diélectrique liquide utilisé .

Conclusions .

63

Annexe .

65

Introduction :

Un jour des hommes pensèrent à frotter deux pierres pour faire du feu , en ne sachant pas qu'ils allaient en même temps découvrir une nouvelle forme d'énergie : l'électricité .

L'électricité est une des formes d'énergie , hélas découverte que des millénaires plus tard , au cours du 17^{ème} siècle .

L'ère des moteurs électriques , alternateurs , transformateurs et autres appareillages électriques allait alors commencer . Seulement ces découvertes n'allaient pas seulement prodiguer confort et aisance , mais entraîner l'apparition de problèmes d'exploitation .

Dans la majorité des équipements en électrotechnique , une isolation des conducteurs est nécessaire . Celle-ci est une des sources de difficulté en Génie Electrique .

Les isolants utilisés peuvent êtres gazeux , liquides ou solides . Dans la plupart des cas il s'agit de diélectriques , utilisés dans la construction de matériels haute tension (câbles , transformateurs , condensateurs et autres) très souvent combinés .

Cette combinaison peut être voulue ou non . Celle-ci laisse apparaître de nouveaux problèmes dus à la présence d'une interface fluide / solide de manière générale .

En effet , dans ce type d'isolation l'interface constitue un point faible . Dans la majorité des cas , des décharges électriques y prennent naissance , progressent et font aboutir au claquage .

Hormis le cas d'une forte surtension , où le claquage peut être immédiat , ce dernier peut être le fruit d'une dégradation progressive du matériau qui peut avoir plusieurs origines .

Parmi ces origines nous retrouvons la température , les pertes diélectriques , les décharges internes répétées et autres . L'influence de tous ces facteurs dépend de la nature même des diélectriques en présence dans l'isolation .

Par ailleurs , pour diverses raisons , les diélectriques solides autrefois utilisés sont remplacés progressivement par des polymères synthétiques dont la découverte est relativement récente . Toutefois , ces produits sont aussi confrontés aux problèmes des décharges électriques .

Dans les isolations (électriques) mixtes liquide / solide , les décharges peuvent soit progresser en volume ; elles sont alors dites " Arborescence " ; soit le long de l'interface et il s'agit alors des " Streamers " . Ces derniers font l'objet de notre étude .

En premier lieu , nous présenterons les principaux travaux effectués à ce jour , concernant les phénomènes de conduction des les diélectriques liquides puis solides .

Dans une troisième et quatrième partie de ce mémoire , il sera d'abord décrit et mis en évidence le phénomène d'interface ainsi que la progression des décharges le long de celle-ci .

Puis nous aborderons la présentation et l'étude des phénomènes de polarisation .

Ces phénomènes étant importants dans la présence ou la création de porteurs de charges dans le diélectrique , nous avons jugé utile de rappeler les travaux de **Faraday** ; ainsi que les principaux types de polarisation .

Les diélectriques utilisés étant des polymères et faisant l'objet de toute une science , le deuxième chapitre sera consacré à la présentation des divers types de polymérisation , à la classification des polymères .

Nous y retrouverons en outre les caractéristiques du PVC (polychlorure de vinyle) et de l'EPDM (éthylène propylène diène modifié) .

Dans le troisième et dernier chapitre , nous décrirons les techniques et dispositifs de mesure utilisés .

Nous présenterons et discuterons ensuite les résultats de notre étude expérimentale .

Celle-ci portera sur l'influence du temps d'application et du niveau de la tension appliqué ; ainsi que sur l'importance de la forme des électrodes et de pureté de l'huile isolante utilisée sur la propagation des streamers aux interfaces Borac22/PVC et Borac22/EPDM .

Evidement , nous finirons par une conclusion générale sur tous les résultats obtenus .

CHAPITRE 1

RAPPELS SUR LES DIELECTRIQUES

1.1 : Phénomènes de conduction dans les diélectriques liquides :

Depuis leur utilisation dans les transformateurs , en 1887 avec le dépôt du brevet de **G.Westinghouse** , les isolants liquides occupent une place très importante dans les techniques d'isolation . [1]

Ces liquides peuvent être des huiles minérales ou des produits de synthèse tels que les PCB (Polychlorobiphéniles) . Leurs applications ne se limitent pas seulement aux transformateurs de puissance , mais concernent aussi les disjoncteurs , les condensateurs ainsi que l'imprégnation du papier .

Pour des raisons techniques ou de sécurité , certaines de ces huiles sont progressivement remplacées . C'est le cas des PCB , remplacées par le Néocapate de Benzyle (BNC) ou le Phénylxyléthane (PXE) .

Récemment des gaz liquéfiés comme l'Azote ont été proposés comme isolants dans les matériels cryogéniques .

Cependant , comme tout autre produit ou matériel , ces isolants liquides ne sont pas parfaits . Des phénomènes de conduction y prennent naissance , pouvant entraîner le claquage , l'objectif de ce chapitre sera d'en donner les principales raisons connues à ce jour .

1.1.1 : La conduction aux champs électriques élevés :

En 1934 , **A.Nikuradsé** a proposé son interprétation du phénomène de conduction dans tous les liquides purs . Il distinguait trois zones dans la caractéristique $I(E)$ d'un diélectrique liquide (figure1) [1] .

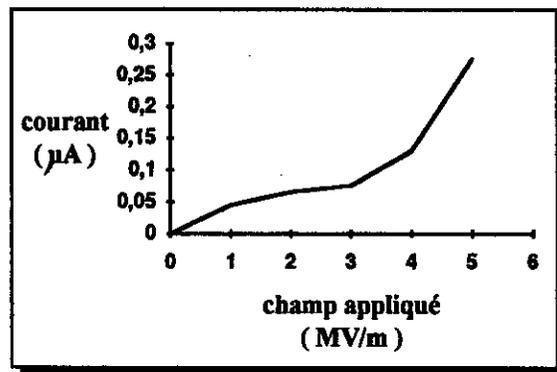


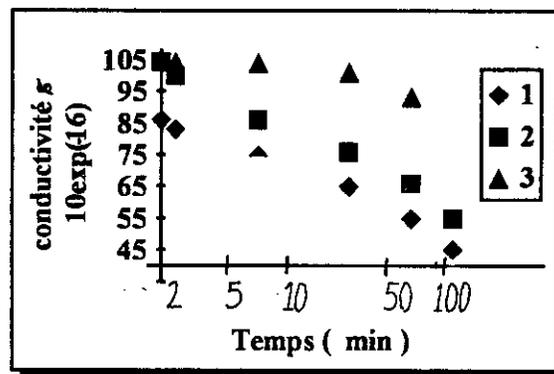
Figure 1 : Caractéristique I-E d'un diélectrique liquide [1]

La première zone reflète une conduction ohmique , pour de faibles valeurs du champ

électrique . Les procédés de purification n'étant pas parfaits , des impuretés dissoutes permettent le passage d'un courant . En 1964 Brière , constate la fine corrélation entre la conductivité des diélectriques liquides et le procédé de purification [1] .

La zonē 2 correspond à une conduction due aux cinétiques de dissociation ionique , pour des valeurs moyennes du champ électrique . Une diminution de la pente caractérise cette zone .

Lorsque la tension est établie , les ions préexistants dans le liquide migrent vers les électrodes , tandis que d'autres sont créés par dissociation . Un phénomène " d'épuration électrique " traduit la diminution du courant pour des champs appliqués de l'ordre du kV/ cm (en 1946 Oncleye et Hollibaugh ; en 1979 Shimokaura , Ohashi et Ueda) (figure 2) [1] .



1 . 500 V - 2 . 200 V - 3 . 20 V

Figure 2 : Conductivité d'une huile minérale en fonction du temps [1]

Dans la zone 3 , on observe une remontée rapide du courant jusqu'à la rupture diélectrique .

Par analogie à la théorie de Townsend , Nikuradsé attribue cela à une émission cathodique d'électrons pouvant ioniser le liquide , seulement il est montré aujourd'hui que l'ionisation par collision est inexistante pour des valeurs de champ inférieures à 500 kV/cm , voir même 1MV/cm [1] .

1.1.2 : Emission d'électrons à la cathode :

Les phénomènes de conduction dans les diélectriques liquides peuvent aussi traduire un processus d'émission froide à la cathode . Des électrons franchissent la barrière de potentiel par effet Tunnel .

La densité de courant J se calcule alors par la relation de **Fowler-Nordheim** :

$$J = A \cdot E^2 \cdot \exp(-b/E) \quad (1)$$

E : champ électrique

A : paramètre

b : paramètre , fonction de la barrière de potentiel

En 1956 , **Morant et House** , ont montré que le champ électrique à considérer dans l'expression (1) pouvait valoir dix fois le champ électrique appliqué , à cause des aspérités microscopiques , même pour des surfaces très bien polies .

En fait pour remarquer une augmentation sensible de courant , il faudrait que les champs locaux atteignent les 10^7 V/cm , ce qui correspond à au moins un ordre de grandeur de plus que la rigidité diélectrique du liquide [1] .

Les irrégularités de surface font que les champs locaux sont beaucoup plus élevés que les champs moyens mesurés expérimentalement .

A l'émission doit succéder un processus de multiplication entraînant une avalanche.

La condition suivante (avancée pour la première fois par **A. Von Hippel**) est nécessaire à l'enclenchement d'un processus d'avalanche : [1]

$$c.h.v \leq \lambda.q.E \quad (2)$$

q : charge de l'électron ou de l'ion

E : champ électrique

λ : libre parcours moyen

c : constante

$h\nu$: quantum d'énergie perdu par l'électron lors des collisions avec les molécules du liquide .

Toutefois l'hypothèse d'une émission électronique n'est pas suffisante pour aboutir au claquage .

1.1.3 : Courant dû au mouvement de particules :

Des particules submicroniques peuvent contaminer le liquide et favoriser le passage d'un courant de conduction , lors de l'application d'un champ électrique .

En 1968, **Krasuki**, en supposant qu'il s'agisse de particules sphériques conductrices, propose l'interprétation suivante.

A l'anode ces particules présentes dans le liquide, acquièrent instantanément une charge électrique +Q, elles sont ensuite refoulées dans le liquide.

Dans leur mouvement, ces particules alors chargées, sont attirées vers la cathode puis neutralisées. Celles-ci prennent enfin une charge -Q à la cathode et quittent celle-ci.

Ainsi, un mouvement oscillatoire se poursuit indéfiniment.

La charge Q est donnée par :

$$Q = (2/3) \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r^2 \cdot E \quad (3)$$

ϵ : permittivité du liquide, r : rayon de la particule

Toutefois, les nombreux travaux effectués depuis 1968, montrent que le mouvement de particules ne contribue qu'à une petite fraction du courant de conduction.

1.1.4 : Phénomène électrohydrodynamique :

Il s'agit d'un phénomène d'électroconvection, provoqué par des charges d'espace, entraînant un accroissement de la conductivité du liquide.

La densité de courant augmente avec le champ électrique. S'il se produit une injection unipolaire, la densité de courant J tend vers une valeur limite supérieure définie par : [1]

$$J = (9/8) \cdot (\epsilon \cdot \mu \cdot V_0^2) / l^3 \quad (A) \quad (4)$$

μ : mobilité de l'électron

ϵ : permittivité du liquide

l : distance entre les électrodes

V_0 : tension appliquée

En atteignant une valeur critique V_0 de la tension, le liquide se met en mouvement.

Les travaux les plus remarquables à ce sujet ont été effectués en 1971 par **Felici** et ses collaborateurs [1] .

D'après cet auteur, l'interaction entre les charges d'espace et le champ électrique entraîne l'apparition de forces mettant en mouvement le liquide.

Un phénomène d'injection à l'interface électrode / liquide est la principale source de porteurs de charges.

- Le gaz absorbé sur les électrodes [3] .
- Les vaporisations locales autour des irrégularités à la surface des électrodes , principalement sous l'effet du champ électrique [3] .
- Une répulsion électrostatique des charges d'espace . [1]

Les forces électrostatiques donnent à la bulle une forme allongée , qui se prononce d'avantage jusqu'au claquage . L'énergie contenu dans la bulle est : [3]

$$W = (1 / 2 . \pi) v / (\epsilon_1 - \epsilon_2) . E_2 . E_0 dv \quad (7)$$

v : volume de la bulle

E_0 : intensité du champ appliqué

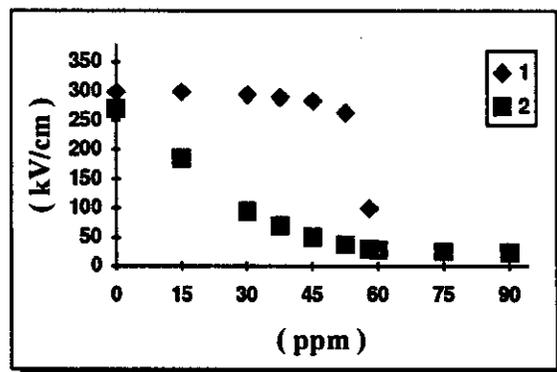
E_2 : intensité du champ à l'intérieur de la bulle

ϵ_1 et ϵ_2 : constantes diélectriques du liquide et de la bulle

Lorsque la bulle est formée , le claquage suit très rapidement car une décharge peut se produire dans la vapeur dont la rigidité diélectrique est faible (Schmidt en 1982) [1] .

Outre les origines déjà citées , les phénomènes de claquage dans les diélectriques liquides dépendent aussi d'autre facteurs :

* Des impuretés contenues dans le volume du liquide telles que l'eau , les particules conductrices dissoutes , gaz dissous et autres (figure 3) .



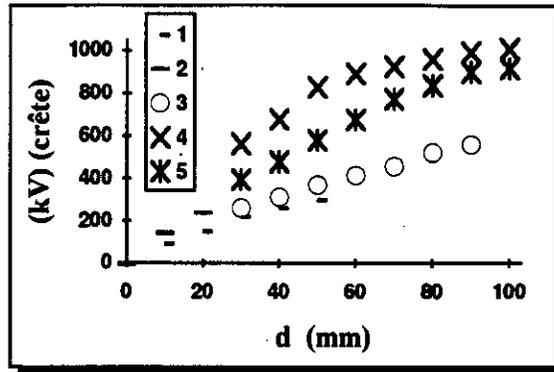
1 . Huile en état de livraison

2 . Huile +2,5 10⁻³ % en poids de fibres de cellulose
(J.Schöber et W.Strittmater , 1963)

Figure 3 : Rigidité diélectrique d'une huile minérale en fonction de sa teneur en eau [1] .

* De la distance entre les électrodes . Le champ disruptif varie en sens inverse de la distance sus-citée (figure 4) .

En effet la probabilité de rencontrer un " Point Faible " croit avec le volume du liquide contenu entre les électrodes sous tension (Wilson en 1953).



1 : W.Hauschild,1970 2 : J.K.Nelson,1971

3 et 4 : G.Maier,1967 5 : B.Ganger,1968

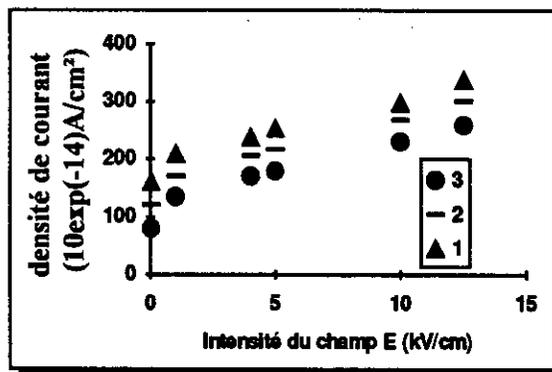
Figure 4 : Rigidité diélectrique d'huiles minérales sous tension alternative (50 Hz) [1] .

* De la géométrie des électrodes et de leur surface . En augmentant la surface , la rigidité diélectrique diminue , le volume du liquide étant en même temps augmenté (Wéber et Endicott ,1957) , (Nelson , 1971) [1] .

* Comme déjà cité , la température , est un paramètre très important .

Pao fait partie des auteurs ayant étudié l'influence de la température sur la conduction naturelle et induite des diélectriques liquides [3] (figure 5) . Nous pouvons observer que la pente des droites dans les zones de saturation ne varie pas .

Ses travaux furent effectués sur de l'air liquide et de l'isooctane irradié par des rayons γ . Il a en outre montré que le courant de conduction croit en fonction de la température [3] .



Température d'essai : 1 : 315 °K , 2 : 260,6 °K ,
3 : 210 °K .

Figure 5 : Variation de l'intensité i du courant (en 10^{-14} A.cm⁻²) en fonction de l'intensité du champ E (kV/cm) à différentes températures [2] .

Notons enfin que cet auteur n'a remarqué aucune influence de la polarité de la tension sur la valeur du courant .

1.2. Phénomènes de conduction dans les diélectriques solides :

Il s'avère parfois inévitable d'avoir à utiliser des isolants solides dans des systèmes électrotechniques , ne serait ce qu'en support mécanique des électrodes .

Ces matériaux accompagnèrent , dès le XVI^{ème} siècle , la naissance et le développement de l'électricité . Il s'agissait alors d'isolants naturels tels que le Bois , le Verre , le Souffre, et autres .

Seulement , au cours du temps , l'atteinte de niveaux de tension de plus en plus élevés et de systèmes plus complexes , a poussé la recherche de matériaux plus performants .

Ce n'est qu'à la fin de la deuxième guerre mondiale , que de nouveaux procédés chimiques ont permis cela . Ce fût l'apparition des polymères synthétiques .

Toutefois , des imperfections subsistaient dans ces nouveaux matériaux , des phénomènes de conceptions peuvent y apparaître , entraînant parfois la perforation , pour diverses raisons que nous tenterons d'élucider dans ce chapitre .

1.2.1 Mécanismes de rupture diélectrique des isolants solides :

Dés 1922, **Wagner** formula la première théorie de rupture dans les diélectriques solides [1] . L'augmentation de la conductivité électrique et des pertes diélectriques dans un isolant solide , entraîne l'apparition de points chauds dans le matériau .

L'échauffement localisé (auto-extensif) provoque une destruction progressive du diélectrique . Le facteur influent principal étant la température ,ce mécanisme est nommé " Mécanisme thermique " .

Dés lors apparaît une nouvelle théorie basée sur le phénomène d'ionisation , décrite en 1932 par les travaux **Gemant** et **Philipof** , en 1934 d'**Austen** , en 1951 **Whitehead** et en 1959 par ceux de **Masson** .

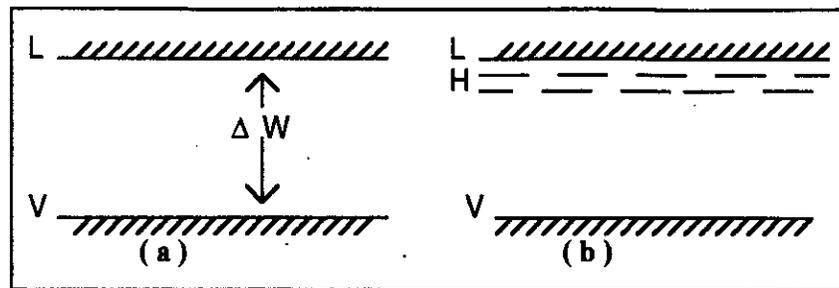


Figure 6 : Diélectrique idéal (a) et diélectrique réel (b) selon le modèle des bandes d'énergie [6] .

Une autre théorie de claquage est basée sur le modèle des bandes d'énergie , la figure 6.a représente un isolant idéal , aucun électron ne se trouve dans la bande de conduction L , la conductivité du matériau est par suite nulle .

La perturbation de cette structure ou la présence d'atomes étrangers , peut permettre aux électrons de peupler la zone interdite (H) (fig.6.b) , au niveau des pièges proches de la bande de conduction (en 1951 Whitehead et en 1964 Anderson) .

Certains électrons n'auront donc pas à parcourir toute la bande interdite pour passer à la bande de conduction [4 ,5.a] . Cet effet tunnel décrit en 1934 par C.Zener [4] , peut entraîner la présence d'un grand nombre d'électrons , même à température ambiante , ce qui favoriserait l'augmentation de la conductivité du matériau .

Le mouvement des électrons est , en partie , conditionné par la température , la conductivité est exprimée par :

$$\sigma_i = \sigma_0 (\exp (-W / (K.T))) \quad (8)$$

W : énergie thermique d'activation du processus

K : constante de Boltzman .

T : température absolue

σ_0 : facteur de proportionnalité .

Parallèlement , un axe de recherche différent fût suivi en 1931-32 par A.Von Hippel et en 1937 par Frölich .

Von Hippel établit sa théorie en se basant sur les phénomènes d'avalanches électroniques dont l'origine peut être des électrons libérés par la cathode , ou ceux libres dans le matériau ou encore des impuretés contenues dans ce dernier .

Les électrons mobiles transmettent l'énergie du champ électrique au matériau , entraînant la vibration des ions du réseau . Dès que la valeur de l'énergie moyenne des électrons dépasse celle dissipée dans le réseau , la rupture diélectrique peut avoir lieu [1] .

Frölich , quant à lui , proposa qu'il faudrait plutôt s'intéresser aux électrons dont l'énergie est voisine du potentiel d'ionisation E_i du diélectrique .

Ce dernier modèle sera d'ailleurs perfectionné , en 1956 , par **Frölich** et **Paranjape** , en introduisant la possibilité d'un échange d'énergie entre les électrons , particulièrement avec ceux fixés dans les pièges .

En 1954 , **Stark** et **Garton** ont quant à eux , montré que la rupture diélectrique pouvait apparaître par effet électromécanique [1] .

Bien après , en 1980 , **Budenstein** proposa sa théorie . Par accumulation d'énergie dans le solide un canal gazeux se forme , à la suite de divers processus de polarisation , ionisation par collision , piégeage de charges . C'est ce dernier qui présente , lors de la décharge disruptive , une conductivité élevée .

D'après cet auteur , ce ne serait donc pas dans le solide même que se produit la décharge complète (finale) .

1.2.2 : Rupture intrinsèque des isolants solides et paramètres influents :

Le terme " rupture intrinsèque " désigne les mécanismes entraînant la perte des pouvoirs isolants d'un diélectrique , après un faible temps de contrainte , sans qu'il n'y ait eu au préalable augmentation de la température et sans présence de décharges partielles .

Cette rupture concerne surtout les matériaux homogènes fortement cristallin [4] .

Pour des valeurs modérés de champ électrique , les isolants solides ont en général une caractéristique $U(I)$ linéaire .

Cependant , lorsque la valeur du champ électrique devient importante , une remarquable augmentation de la conductivité est observée . Ce qui serait dû à la présence d'électrons libres dans la bande de conduction , suite au phénomène de collisions .

Une des raisons de l'augmentation de la conductivité σ du matériau , est l'extraction des électrons fixés dans les pièges , par effet " **Frenkel** " .

Ces pièges sont situés dans la bande d'énergie comprise entre les niveaux de valence et de conduction . [1]

En 1973 , **O'Dwyer** a calculé le nombre d'électrons n_e susceptibles d'être activés [4;5.a] :

$$n_e = K \cdot \exp (- (W - \Delta\Phi \cdot Q_e) / 2.K.T) \quad (9)$$

W : énergie des pièges , mesurée à partir d'un niveau de conduction moyen .

K : constante .

Q_e : charge de l'électron .

$\Delta\Phi$: réduction de la barrière de potentiel , égale à : $2 \cdot ((Q_e \cdot E) / 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_T)$

Si le champ est d'avantage élevé , proche de la rigidité du matériau , la densité locale d'électrons devenant trop importante , ce dernier va chauffer par effet Joule (Mierdel , 1976) .

Il y aura destruction du diélectrique lorsque l'énergie approchera 10^{-5} W/mm^3 (Thomas , 1976) [1] .

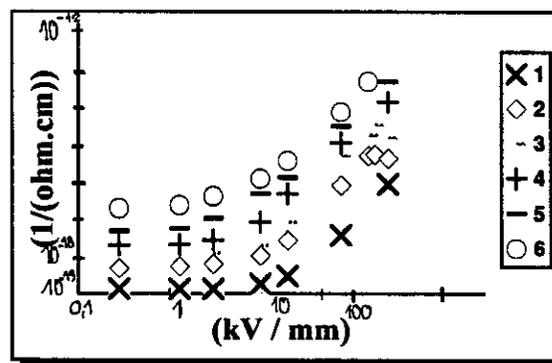
Les électrons en se mouvant peuvent , par collision , céder leur énergie cinétique aux ions . Un phénomène d'avalanche peut alors prendre naissance .

Par contre , en prenant leur énergie du champ électrique , certains électrons peuvent se déplacer vers la bande de conduction sans entrer en collision avec d'autres particules .

Cette conduction sera donc le fruit d'une émission interne du champ électrique (Franz 1956) .

Ce phénomène est surtout observé pour les matériaux amorphes , ou ceux à grand taux d'impuretés . [4]

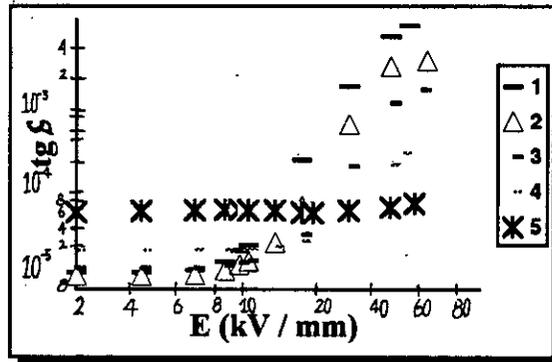
En prenant des échantillons de polyéthylène , en 1981 , Von Haussen et Sachs ont montré que la conductivité σ mesurée sous tension continue , croît très rapidement à partir de 100 kV/cm et que celle-ci est très sensible à la température (figure 7) .



1 : $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 2 : $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 3 : $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$
 4 : $T = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ 5 : $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 6 : $T = 95 \text{ }^\circ\text{C}$

Figure 7 : Conductivité d'un polyéthylène basse densité (en $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$) en fonction du champ appliqué [1] .

Quant au facteur de pertes diélectriques $\text{tg} \delta$, son comportement dépend énormément du matériau même choisi. La figure 8 illustre ses variations en fonction du champ appliqué, à diverses températures.



1: T = 90 °C - 2: T = 80 °C - 3: T = 79 °C
4: T = 50 °C - 5: T = 20 °C.

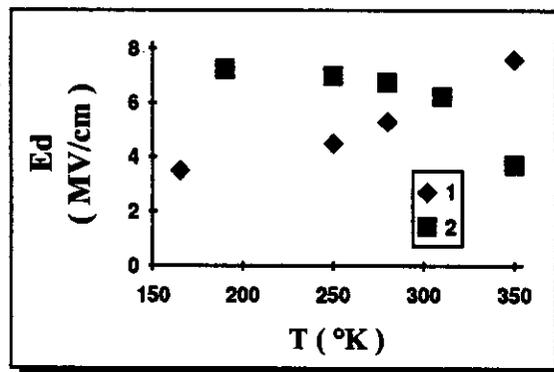
Figure 8 : Facteur de dissipation diélectrique d'un polyéthylène basse densité en fonction du champ appliqué [1] .

Sous tension continue, ces auteurs attribuent les résultats obtenus à une injection d'électrons à la cathode, lesquels sont piégés et forment une charge d'espace négative.

Par ailleurs, comme déjà cité, la température est un facteur très important.

Dépassé un seuil de température, un nombre suffisant de pièges peuvent être vidés, entraînant la conduction du matériau [4] .

En prenant pour exemple le quartz amorphe, la figure 9 montre l'abaissement de la rigidité E_d du matériau, avec l'augmentation de la température.



1 : quartz cristallin - 2 : quartz vitreux

Figure 9 : Rupture diélectrique du Quartz sous tension continue [4] .

Nous remarquons que la génération d'électrons n'est significative qu'à partir d'une certaine température avoisinant les 310 °K .

Ces courbes sont en accord avec les résultats de **Whitehead et Anderson** , établissant la proportionnalité entre E_d et $e^{(\Delta w/2KT)}$ (Δw : énergie d'activation . K : constante de Boltzman) . En 1972 , **Luy et Oswald** ont montré que Δw se situait entre 0,03 et 0,05 ev pour le polyéthylène [1] .

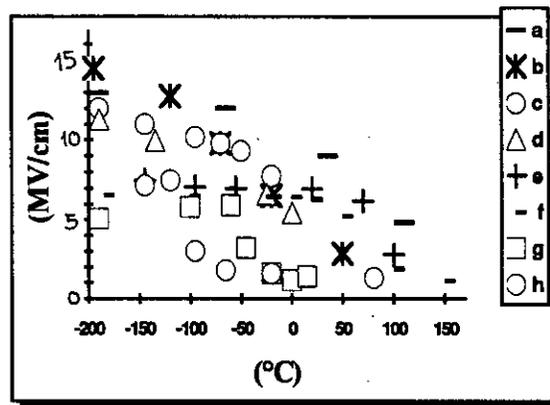
Toutefois , n'oublions pas de signaler que le comportement électrique des diélectriques vis à vis de la température ne peut être parfaitement généralisé . Les courbes $E(T)$ de la figure 10 , obtenues en 1983 par **J.K Nelson** , montrent que les allures sont propres à chaque matériau [1] .

La géométrie des électrodes et le volume de l'échantillon sont aussi des facteurs importants dans l'établissement et le développement d'une décharge . **Tourel et Maillot** ont montré qu'aux bords des électrodes la probabilité de décharge est la plus grande .

Morton et Stannett , en 1968 , établissent que plus l'échantillon solide est volumineux et plus est importante la valeur du champ électrique au claquage [1] .

En effet , plus la distance entre électrodes est faible et plus la multiplication des porteurs de charge dans cet espace est aggravée .

Par ailleurs la non homogénéité du matériau est à réduire au maximum , voir éliminer . Celle-ci favorise la présence de pièges , par lesquels les électrons peuvent êtres , assez facilement libérés .



- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| (a) : PMMA | (b) : Alcool polyvinylique |
| (c) : Acétate de PVC | (d) : P.E. chloré à 55% |
| (e) : Polystyrène atactique | (f) : P.E. basse densité |
| (g) : Polyisobutylène | (h) : Polybutadiène |

Figure 10 : Variation de la rigidité diélectrique des polymères polaires (a,b,c,d) et non polaires (e,f,g,h) en fonction de la température [1] .

Ajoutons à ces facteurs , l'influence non négligeable de l'épaisseur de l'isolant solide , établi en 1968 par Shlūhen) [4] .

En 1962 **Manges , Bergen** et en 1973 **Wagner** (1973) ont montré que le canal de déchargé se développait plus facilement dans les polymères partiellement cristallins .

Notons aussi l'importance du rayon de courbure des électrodes dans l'établissement ou la présence d'une décharge .

En 1963 , **Dittmer** et en 1969 , **Schiweck** en 1969 , ont étudié l'apparition des canaux de décharges partielles dans de l'EP moisi , sous tension impulsionnelle .

Ces recherches ont montré que pour une pointe positive , les charges pouvaient être libérées de la bande de valence ou des pièges , laissant derrière eux des trous , considérés comme charges d'espace positives formées par émission de champ .

Avec une pointe négative , les électrons sont injectés , toujours par émission de champ électrique , dans les pièges entraînant la formation de charges d'espace.

Pour les deux polarités de pointe , des canaux de décharges partielles sont ainsi créés, suite à la multiplication des porteurs de charges par avalanches [4] .

En 1970 , les travaux d'**Artbauer** et **Criac** ont montré que la rigidité diélectrique du matériau isolant dépendait aussi des défauts contenus dans celui-ci (microvides , impuretés , particules ,) [1] .

Un dernier facteur influent est le temps . Après application de la tension au bout d'un temps t_e , un canal de décharges partielles apparaît .

S'élargissant avec le temps , sous forme de branches , ce canal entraîne la détérioration progressive du matériau , pouvant aboutir à la disruption au bout d'un temps t_d [4] .

En 1944 , **Blume** établit une relation entre le temps jusqu'au claquage et la tension appliquée [1] :

$$V = V_0 \cdot (1 + c / t^n) \quad (10)$$

V : tension de claquage pour un temps infini .

c : constante .

n : exposant (en général égal à 1/4) .

Cette expression montre que le temps jusqu'au claquage diminue lorsqu'augmente le niveau de tension .

La figure 11 , montre une relation entre la tension , la fréquence et le temps . Cette relation est introduite sous la forme d'un R défini comme suit :

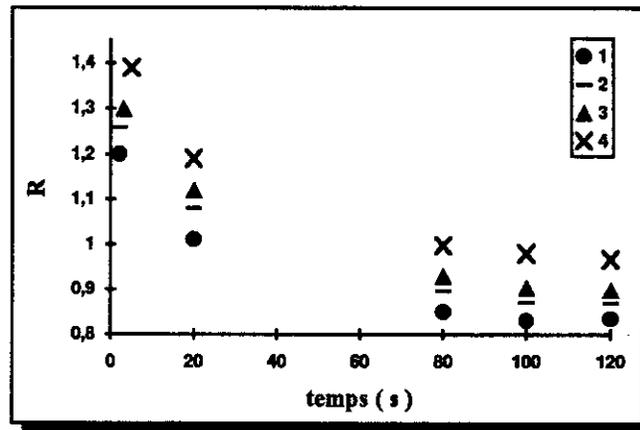
$$R = (K / f^{0,137}) \cdot (V_0 / V_1 + (1 - V_0 / V_1) / t^{0,25})$$

Avec :

f : la fréquence

t : le temps

V₁ : la tension correspondante au temps t égal à 1 min .



1 : 420 Hz - 2 : 200 Hz - 3 : 120 Hz - 4 : 60 Hz .

Figure 11: Variation de R pour un complexe : Press board (2,4mm) + Huile minérale (4,8mm) + Press board (2,4mm) [1] .

1.2.3 : La rupture diélectrique due au "volume libre" des polymères :

Les causes de la perforation des isolants solides peuvent être soit d'origine externe (température, électrodes, ...) soit d'origine interne .

La composition chimique du polymère (poids moléculaire, additifs, ...) et sa structure physique (cristallinité, microvides, contraintes mécaniques, ...) ont un rôle important dans l'établissement d'une décharge (1980 Ieda) [1] .

En 1977, Sabuni et Nelson ont montré que les températures de transition vitreuse et celles correspondantes à une diminution de la rigidité diélectrique coïncidaient fortement, en étudiant des échantillons de polybutadiène, de polystyrène et de leurs copolymères .

Au point de transition vitreuse, le réarrangement de la structure du polymère modifie son volume libre, qui avec un accroissement de la température entraîne une diminution de la rigidité diélectrique .

Ces travaux ont en outre renforcé la théorie d'Artbauer basée sur le mouvement des porteurs de charges dans le volume libre des polymères .

1.2.4 : Mécanisme électromécanique de rupture diélectrique :

Cette théorie se base sur le fait qu'en appliquant un champ électrique à un système d'électrodes , entre les quelles se trouve un diélectrique solide , une pression électrostatique s'exerce sur les parois du solide .

Celle-ci en augmentant , peut entraîner la perforation du diélectrique .

En 1955 , Stark et Garton ont montré que pour des films minces de polyéthylène (50 μm) , la perforation se produisait à 50 MV/cm , pour une pression électrostatique d'environ 26 kg/cm² [1] .

1.2.5 : Mécanisme thermique de rupture diélectrique :

Dans les matériaux diélectriques , les pertes diélectriques citées sont celles dues aux phénomènes de conduction , de polarisation , et d'ionisation .

Ces pertes , elles mêmes dépendantes de la température , entraînent l'échauffement du matériau et peuvent causer la rupture diélectrique de l'isolant .

Les premiers travaux effectués à ce sujet furent , en 1922 , ceux de K.Wagner [4] .

La relation fondamentale , permettant l'étude du claquage thermique , sous tension continue est :

$$\sigma \cdot E^2 = C_V \cdot (dT / dt) - \text{div}(\chi \cdot \text{grad}(T)) \quad (11)$$

σ : conductivité électrique du matériau $\sigma \cdot E^2$: chaleur produite par effet Joule
 C_V : chaleur spécifique $\text{div}(\chi \cdot \text{grad}(T))$: chaleur dissipée .
 $C_V \cdot (dT/dt)$: chaleur stockée dans le diélectrique .
 χ : conductivité thermique du diélectrique T : température .

Notons qu'en champ alternatif , les pertes diélectriques $E^2 \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \text{tg}\delta$ sont à rajouter à $\sigma \cdot E^2$ [1] .

L'équation de continuité :

$$\text{div}(\mathbf{J}) + dp/dt = 0 \quad (12)$$

est aussi à considérer (J est la densité de courant , p la densité de charge volumique et t le temps) .

Ajoutons à cela $dT/dt = 0$, en considérant une lente variation du champ électrique .

En prenant le cas général d'un échantillon d'épaisseur d et de grande surface , des électrodes de faible résistance thermique et en considérant l'axe Z , qui leur est perpendiculaire , comme direction de la propagation du flux thermique , nous obtenons :

$$d(\chi \cdot dT/dZ) / dZ + \sigma \cdot (dV/dZ)^2 = 0 \quad (13)$$

Avec : $J = -\sigma \cdot dV/dZ = \sigma \cdot E$

En supposant à présent que le refroidissement de l'échantillon est assez efficace pour que sa température superficielle soit égale à l'ambiante T_0 et soit $V=0$, $T=T_m$ pour $Z = 0$ (au centre de l'échantillon) .

En introduisant la relation 8 , nous pouvons calculer une tension critique V_{oc} pour une température critique T_{mc} (J.J.O'Dwyer , 1973) [1] :

$$\begin{aligned} V_{oc}^2 &= 8 \cdot T_0 / T_{mc} (\chi / \sigma) \cdot dT \\ \Rightarrow V_{oc}^2 &= 8 \cdot T_0 / T_{mc} (\chi_0 / \sigma_0) \cdot \exp(W / (KT)) \cdot dT \end{aligned}$$

Comme $W \gg K \cdot T$ et $T_{mc} > T_0$, nous avons :

$$V_{oc} \approx 8^{1/2} (\chi_0 K \cdot T_0^2 / (\sigma_0 W))^{1/2} \cdot \exp(W / (2 \cdot K \cdot T_0)) \quad (14)$$

Dans ce sens , plusieurs travaux ont été effectués en 1925 par Inge , 1954 par M_cLeod en 1967 par Dakin et Boeck en 1967 , en champ alternatif .(figure 12) .

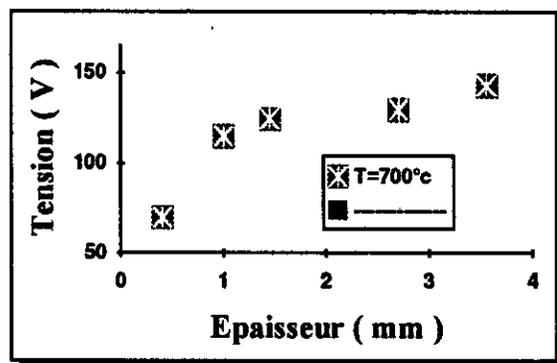


Figure 12 : Claquage thermique du NaCl [1] .

En supposant que l'augmentation de E soit assez rapide , pour que l'échantillon ne cède pas de chaleur , la relation 11 s'écrit :

$$\sigma \cdot E^2 = C_v \cdot dT/dt \quad (15)$$

La résolution de cette équation donne , en supposant que le champ électrique et le temps soit proportionnels ($E = (E_c/tc) \cdot t$) :

$$E_c = ((3 \cdot C_v \cdot K \cdot T^2) / (\sigma_0 \cdot W \cdot tc))^{1/2} \cdot \exp(W / (2 \cdot K \cdot T)) \quad (16)$$

Notons enfin à ce sujet qu'en 1974 , **Winkeln Kemperer et Kalkner** ont montré que les écarts de température par rapport à l'ambiante , pour des échantillons de PVC (épaisseur de 0,24 mm , $\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-2}$) sous champ alternatif élevé (1,5 MV/cm) peuvent être de l'ordre de 60 à 72 °C en régime instable et au centre de l'échantillon juste avant le claquage [1] .

La figure 13 montre la variation de la rigidité diélectrique du polyéthylène en fonction de la température . La chute rapide et prononcée de la rigidité serait attribuée à une injection d'une charge d'espace à haute température (**Inuishi** , 1980 et 1982) .

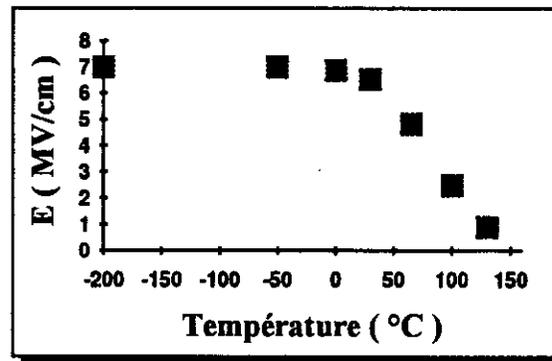


Figure 13 : Rigidité diélectrique du polyéthylène en fonction de la température [1] .

Suite aux théories citées précédemment , nous pouvons voir que dans l'étude des mécanismes de claquage des isolants solides , il existe deux grands axes . La disruption peut être attribuée soit à un mécanisme thermique soit à un mécanisme purement électrique .

Dans le premier , la température est un facteur remarquablement influent sur les pertes diélectriques et la conductivité électrique du matériau , en plus de la contribution du champ électrique .

Dans le second mécanisme , la température influe peu sur le mécanisme de rupture , ce dernier est plutôt dû à des phénomènes proprement électriques .

1.3 : Phénomène d'interface :

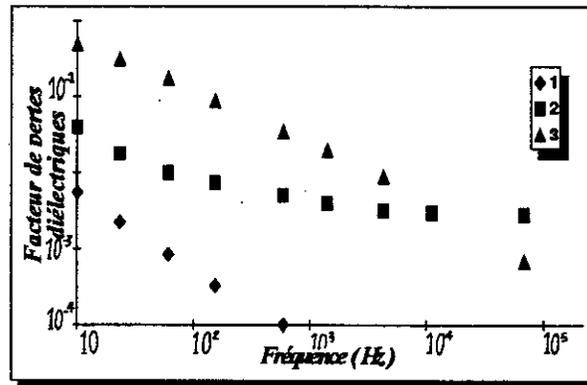
L'utilisation de diélectriques liquides ou solides seuls s'avère parfois insuffisante pour des isolations haute-tension .

Seulement l'éventuelle présence d'une interface liquide/solide dans un système d'isolation laisse apparaître de nouveaux problèmes dus à l'interface .

Nous allons , dans ce chapitre , introduire ce problème et tenter de présenter ses origines et ses effets .

1.3.1 : Mise en évidence d'un effet d'interface :

Le problème présent consiste en l'apparition d'un important courant de conduction et des pertes supplémentaires . En effet , la mesure des pertes diélectriques d'un échantillon imprégné montre que cette valeur est supérieure à celle du diélectrique liquide ou solide seul [6,7] , ce qui affirme l'existence de pertes supplémentaires dues à l'interface (Fig14) .



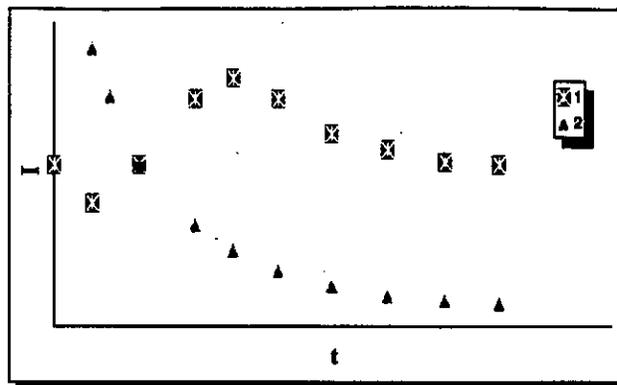
- (1) : CH saturé de TIAP (2) : échantillon non imprégné de verre fritté
(3) : échantillon imprégné

Figure 14 : Variation des pertes en fonction de la fréquence [1]

Par ailleurs , aux interfaces liquide /solide , apparaît une double couche électrique .
Sous l'effet d'un champ électrique continu , le liquide se déplace dans le milieu poreux par électroosmose [6] .

L'électroosmose montre que les charges de la couche diffuse (dans le liquide) participent à la conduction du matériau .

En effet , le pic de courant observé pour le liquide seul disparaît , la caractéristique $I(t)$ prend une allure monotone décroissante (figure 15) .



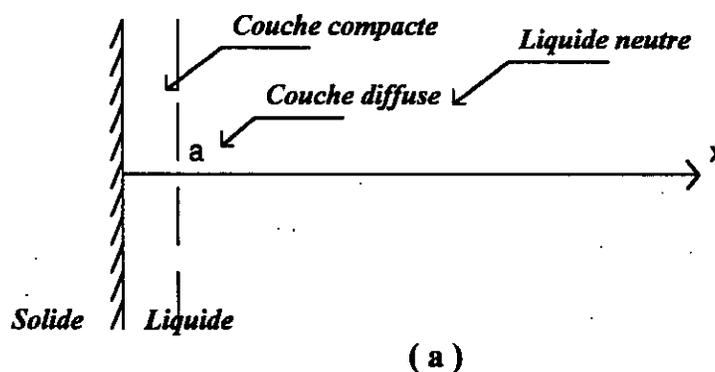
- (1) : forme typique des courants transitoires d'injection unipolaire .
- (2) : forme typique des courants transitoires dans le verre fritté .

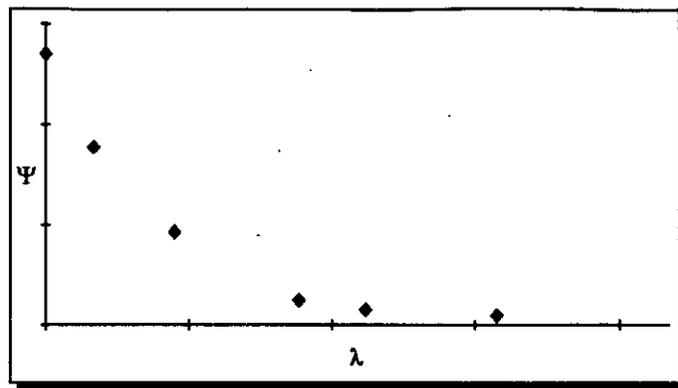
Figure 15 : Courant transitoire en fonction du temps [20]

1.3.2 : Couche diffuse et conductivité superficielle :

L'apparition d'une différence de potentiel à l'interface , fait que les surfaces des diélectriques solide et liquide acquièrent des charges de signes opposés , en vertu du principe de l'électroneutralité , d'où la désignation de double couche électrique .

Parmi les modèles décrivant la répartition des charges dans la double couche , présentons celui de **Guy-Chapman** [6] (figure 16) .





(b)

Figure 16 : a : Schéma de la structure de la double couche .
b : Distribution du potentiel dans le liquide [6] .

La densité de charge à la surface du solide est σ_0 , alors que dans le liquide nous distinguons :

- La densité de charge de la couche compacte , dont l'épaisseur " a " est de l'ordre du rayon ionique . Les ions sont pratiquement collés à la paroi , ce qui fait de cette couche une zone spécifique d'absorption .
- La densité de charge de la couche diffuse ou les lois de l'électrostatique décrivent la répartition de charge .

En un point x de la couche diffuse normale à l'interface , se trouve une concentration n_i d'ions de type i , obéissant à l'équation de **Maxwell-Boltzman** :

$$n_i = n_{oi} \cdot \exp(- (Z_i \cdot e \cdot \psi) / K \cdot T) \quad (17)$$

n_{oi} : concentration ionique loin de l'interface (" initiale ")

ψ : potentiel électrique au point x . T : température .

K : constante de **Boltzman** . Z_i : valence de l'ion i , affectée d'un signe .

Le potentiel ψ , quant à lui , obéit aux équations de **Poisson-Maxwell -Boltzman** :

$$d^2\psi / dx^2 = - \rho / \epsilon = - \sum_i (Z_i \cdot e \cdot n_i / \epsilon) \quad (18)$$

ϵ : constante diélectrique du liquide .

ρ : densité volumique de charge au point x .

En remplaçant (17) dans (18), nous obtenons :

$$d^2\psi / dx^2 = - (1/ \epsilon) . \Sigma Z_i . e . n_{oi} . \exp(-(Z_i . e . \psi / (K . T)) \quad (19)$$

En prenant l'exemple d'un électrolyte monovalent , l'intégration de cette dernière équation , compte tenu des conditions aux limites : $\lim_{x \rightarrow \infty} \psi(x) = 0$; $\lim_{x \rightarrow \infty} d\psi/dx = 0$, montre que ψ décroît exponentiellement à partir de $x=a$, dans la zone diffuse , avec une longueur caractéristique L_d de l'étendu de cette couche :

$$L_d = (\epsilon . K . T / (2 . n_o . e^2))^{1/2} \text{ appelée longueur de Debye } \quad (20)$$

En assimilant cette couche à une surface chargée , sa densité superficielle de charge sera donnée par :

$$\sigma = \int_a^{\infty} \rho dx = - \int_a^{\infty} \epsilon . (d^2\psi / dx^2) . dx = - \psi(a)^{1/0} . \epsilon . d(d\psi / dx)$$

$$\Rightarrow \quad \sigma = \pm 2 . (2 . n_o . \epsilon . K . T)^{1/2} . \text{sh} (e . \psi(a) / (2 . K . T)) \quad (21)$$

Ceci montre la dépendance de σ avec $\psi(a)$ et les caractéristiques du liquide .

Par analogie avec la conductivité volumique $\sigma_v = K . \rho$ (K : mobilité ionique et ρ : densité volumique de charge) , on aboutit à la conductivité superficielle :

$$\sigma_s = K . \sigma = 2 . K . (2 . n_o . \epsilon . K . T)^{1/2} \text{sh}(e . \psi(a) / (2 . K . T)) \quad (22)$$

1.3.3 : Conduction dans une isolation mixte liquide/solide :

Deux grandes théories furent avancées pour expliquer les phénomènes de conduction dans de telles isolations :

- La théorie de **Garton**
- La théorie linéaire de **Maxwell-Wagner** .

Selon **C.G.Garton** l'application d'un champ électrique a pour effet d'attirer les ions du liquide vers la paroi du solide . Ces ions sont refoulés vers le liquide lors de l'inversion du champ électrique , et donc sans pénétrer cette paroi ni même y adhérer [6 , 8 , 9] .

La théorie de **Garton** , dite aussi effet **Garton** , est fondamentalement non linéaire .

En effet le courant ionique responsable de la conduction , n'apparaît que dans de brefs intervalles , lors de l'inversion du champ .

Sous certaines conditions (nombre total d'ions constant et couche du liquide assez mince) les prédictions de **Garton** sont : [9]

- * $\text{tg} \delta$ décroît en $V^{-3/2}$
- * $\text{tg} \delta$ croît en $Q^{1/2}$
- * $\text{tg} \delta$ diminue lorsque θ augmente , puisque les pertes diélectriques $\text{tg} \delta$ sont liées à la mobilité par $\text{tg} \delta = a \cdot K^{-1/2}$, ou a est un facteur de proportionnalité .

Avec : Q : la pulsation . V : la tension . θ : la température .

Ceci a été vérifié , du moins qualitativement pour le papier imprégné [11] .

Quant à la théorie linéaire de **Maxwell-Wagner** , pour un système mixte papier-huile , ou le solide est un bon isolant alors que le liquide présente une certaine conductivité , elle montre que [9 ,10] :

- * $\text{tg} \delta$ est indépendant de V
- * $\text{tg} \delta$ diminue lorsqu'augmente Q .
- * $\text{tg} \delta$ croît avec la température (la résistivité du liquide décroît) .

Nous constatons de remarquables différences entre les deux théories .

Notre contribution , consistera à suggérer pourraient pénétrer dans le papier , sous tension continue , et ne retourneraient pas dans le liquide si celle-ci était inversée .

Ceci étant dit à la base des observations faites en tension continue , et qu'en général la permittivité des liquides est inférieures à celle des solides [21] .

Le réexamen de la théorie de **Garton** , suite au développement des matériaux synthétiques , a donné les résultats suivants :

- Seuls les ions à l'interface céramique/huile vérifient totalement cette théorie .
- Une fraction significative des ions à l'interface papier/huile pénètrent , dans le solide sous tension alternative ou continue . La mesure de $\text{tg} \delta$ a montré que ces ions contribuent faiblement aux pertes , ce qui approuve en grande partie la théorie de **Garton** .
- L'étude par analyseur de pertes diélectriques , a montré lors de l'essai d'autres polymères , la disparition très rapide et définitive de la partie non linéaire des pertes .

Ceci approuve plus la théorie linéaire , bien que l'on ai remarqué une grande corrélation entre $\tan \delta$ et V [12] .

Sous tension élevée , la presque totalité des ions du liquide sont absorbés par le solide , ce qui augmenterait les pertes linéaires de ce dernier .

Il a en plus été effectivement remarqué que $\tan \delta$ décroît en $1/Q$ et augmente avec θ .

Les ions absorbés par le solide en gardant leurs propriétés ne semblent pas se recombinaer . Lors de l'interruption de la tension ils retournent très lentement dans le liquide [12] . Cette absorption dépend fortement des propriétés du matériau solide , essentiellement de sa nature et de sa cristallinité , l'augmentation de cette dernière rend plus difficile la pénétration dans le solide .

La fréquence est aussi un paramètre influent . Sous tension alternative , il parait clair que les ions des deux signes sont absorbés . Ceci atténue le champ électrique dans le liquide , par impossibilité de formation de charges d'espace , ce qui explique le fait que sous tension continue l'absorption est moindre .

Les matériaux hautement hydrophobes ont une durée de vie relativement faible , sous haute tension en présence d'humidité . En effet , il a été remarqué que le liquide pénétrait en partie dans le solide , ce qui entraîne l'humidification de ce dernier . La solvation explique cette pénétration [12] .

La présence de fissures dans la structure des polymères parait aggraver l'absorption ionique , ainsi que le passage du liquide ; Ce fait est loin d'être négligeable car les défauts sont omniprésents dans les chaînes de polymère .

Enfin notons que les pertes diélectriques à l'interface augmentent avec la surface totale de contact solide/liquide [6] .

1.4 : Décharges à l'interface liquides/solides isolants :

- Phénomène des streamers -

Nous présentons dans ce qui suit , le comportement des streamers à l'interface d'une isolation mixte hétérogène liquide /solide diélectriques .

De nouvelles techniques optiques ont permis la mise en évidence de perturbations nommées " streamers " précédant le claquage dans les isolations mixtes [13] .

1.4.1 : Disposition parallèle des isolants :

Dans cette disposition , les surfaces limites liquide/solide sont parallèles aux lignes de champ . En général , le claquage a lieu le long de l'interface , pour des tensions inférieures à celle des diélectriques seuls [14] .

L'expérience a aussi montré que les interfaces liquide/solide et solide/gaz avec de grand rapports de permittivité tendait à abaisser la tension de génération des décharges .

R.J.Taylor a étudié l'influence de la permittivité des matériaux sur la rigidité de l'isolation [14] . En prenant trois liquides diélectriques de permittivités différentes , huile de transformateur ($\epsilon_r = 2,15$) ; huile Aroclor ($\epsilon_r = 4,85$) ; huile Silicone ($\epsilon_r = 2,6$) dans lesquelles sont successivement immergés six diélectriques solides de 5mm d'épaisseur chacun , découpés en disques de 12 mm de diamètre .

Notons que les dimensions des solides étaient inférieures à celle des électrodes , ainsi ils ne constituaient pas de barrière isolante qui améliorerait la rigidité de l'isolation .

Pour tenir compte de la variation de la rigidité du liquide à chaque valeur de permittivité , Taylor définit l'efficacité de l'entretoise " K_1 :

$$K_1 = (\text{Tension de claquage du système liquide/solide}) / (\text{celle du liquide seul}) . \quad (23)$$

Les études ont été faites en fonction du rapport des permittivités interfaciales ϵ_1 défini comme suit :

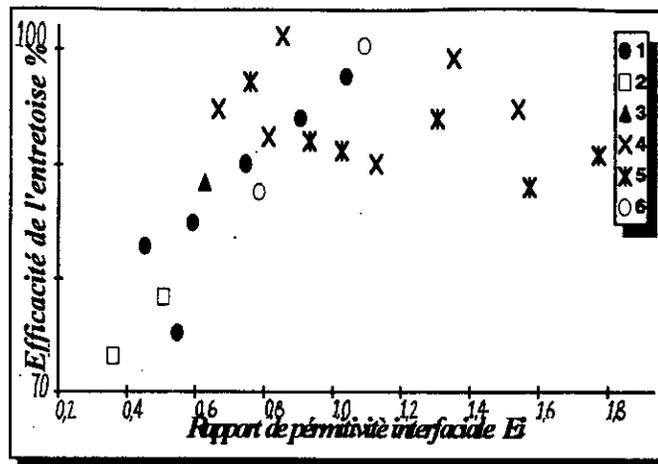
$$\epsilon_1 = \epsilon_s / \epsilon_l = \text{Permittivité du solide} / \text{Permittivité du liquide} . \quad (24)$$

Les figures 17 et 18 illustrent respectivement les courbes de variation de K_1 et du nombre de cales solides ayant subis une perforation en fonction de ϵ_1 .

Bien que toutes les cales n'aient pas subis de perforation , la majorité des zones de claquage se trouvent adjacentes à la surface des solides .

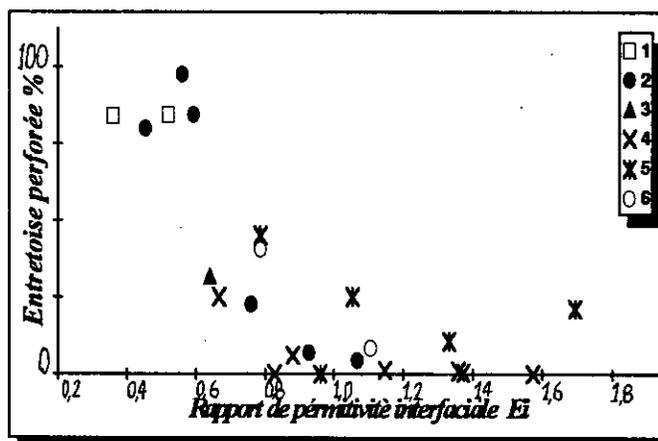
Les irrégularités de surface se trouvent en série dans cette disposition , leur différence de permittivité provoque une élévation de l'intensité du champ électrique .

La figure 17 montre l'influence de ϵ_1 sur le processus de décharge , elle laisse prétendre que K_1 tend vers 100% lorsque ϵ_1 est proche de l'unité .



- (1) : Presspahn (2) : Permali (3) : Polysulfure
 (4) : Polycarbonate (5) : Oxyde de polyphénylène (6) : Perspex

Figure 17 : Variation de l'efficacité de l'entretoise avec ϵ_i [14]



- (1) : Permali (2) : Presspahn (3) : Polysulfure
 (4) : Polycarbonate (5) : Oxyde de polyphénylène (6) : Perspex

Figure 18 : Variation de perforation de l'entretoise avec ϵ_i [14]

L'allure de la courbe 18 laisse prétendre que le minimum serait atteint pour ϵ_i proche de l'unité.

La synthèse de ces deux relevés montre la grande probabilité de génération des streamers ailleurs qu'à l'interface .

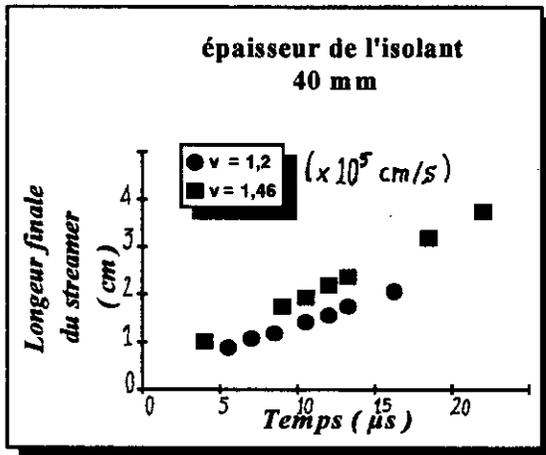
D'une part la distorsion du champ électrique tend à initier le processus de décharge , vu son intensification [14] , mais d'autre part elle peut dévier le canal de la décharge loin de l'interface et l'empêcher donc à ce niveau .

A ce sujet, Hauschild [15] propose que le long de l'interface, la décharge progresse par sites localisés [16], le développement de la décharge serait donc progressif.

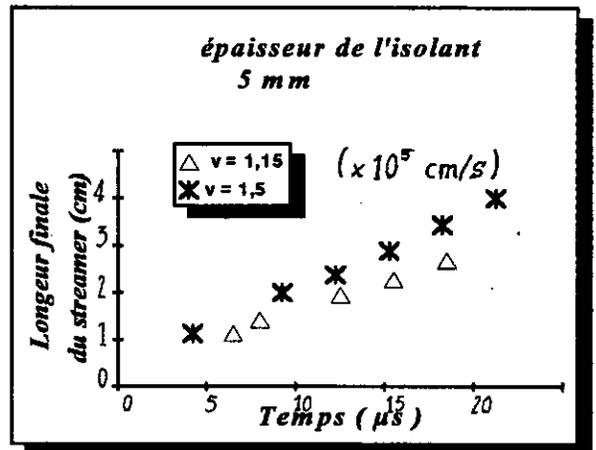
1.4.2 : Disposition des isolants perpendiculaire au champ :

En prenant des échantillons d'Acrylic d'épaisseur de 3,5 à 10 mm, immergés dans de l'huile parafine, Ohgaki et Tsunoda ont étudié en géométrie pointe-plan, sous tension impulsionnelle 0,5/2500 μ s, le développement des streamers positifs (pointe positive) par la méthode optique de strioscopie (Schliren [17]).

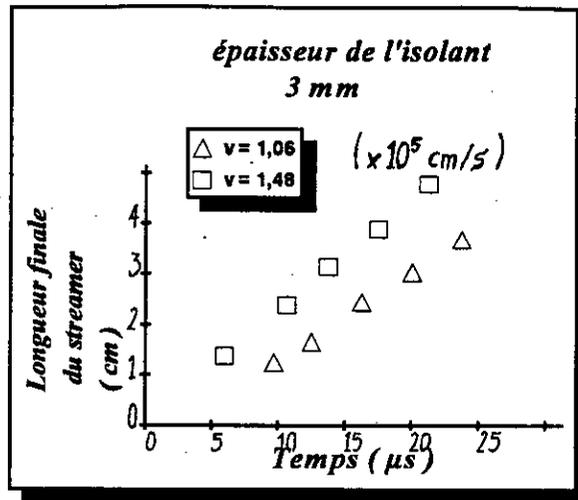
L'analyse de l'évolution temporelle des streamers est faite à partir des photographies prises à des temps très brefs (figure 19).



(a) : Tension appliquée 80 kV



(b) : Tension appliquée 65 kV



(c) : Tension appliquée 60 kV

Figure 19 : Longueur finale du streamer en fonction du temps [8] .

"l" étant la longueur du plus grand streamer

v : la vitesse de propagation du streamer (x 10⁵ cm / s)

Il est remarqué qu'à tension et épaisseur du solide données , la longueur finale du streamer semble , à partir de 0,5 cm , être proportionnelle au temps .

L'ordre de grandeur de la vitesse de propagation est estimé à 1 km/s .

Le même résultat a été obtenu par Devins et Al , dans des conditions similaires avec de l'huile Marcol70 [17] .

D'autres études menées par Atten et Saker [18] sur une interface verre/huile de transformateur ont aussi donné le même résultat pour deux polarités différentes de pointes .

Les résultats obtenus par Beroual , dans des volumes de liquide , sous créneau de tension en géométrie pointe-plan ont montré que les streamers positifs étaient filamenteux et que leur vitesse valait 2 à 50 fois celle des streamers négatifs .

L'ensemble des résultats a montré la lenteur et l'allure en buissons des streamers négatifs , [13 , 19] il est en outre apparu que les streamers positifs sont plus rapides (figure 20) .

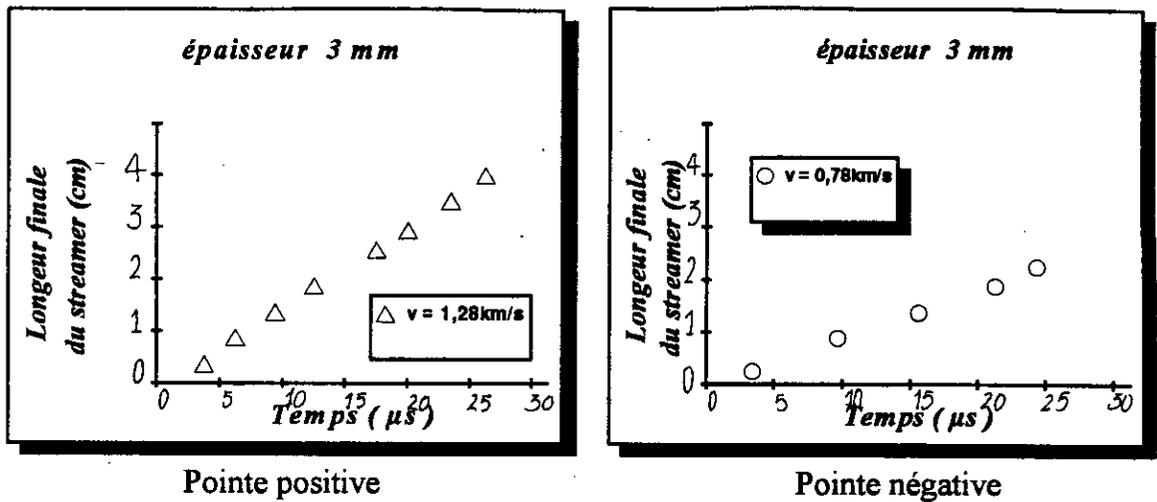
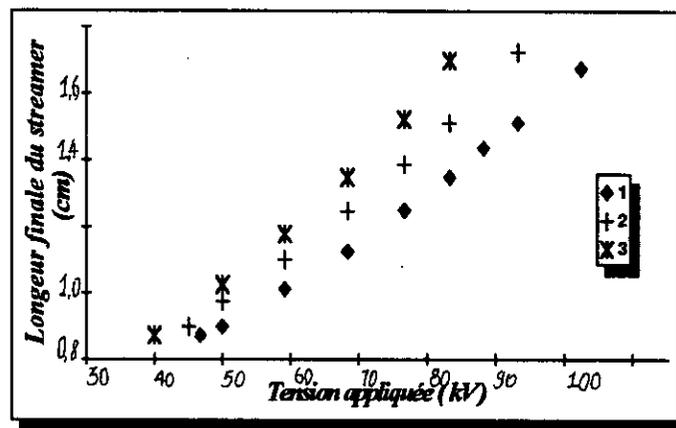


Figure 20 : Longueur finale du streamer en fonction du temps [16] .

Que ce soit dans des volumes de liquide diélectrique ou dans une isolation mixte , une fine corrélation apparaît entre la forme et la vitesse de propagation des streamers , la lumière émise ; le courant et par suite la charge , quelque soit la polarité des électrodes [13].

La figure 21 montre l'influence de la tension sur la longueur finale l_f du streamer .

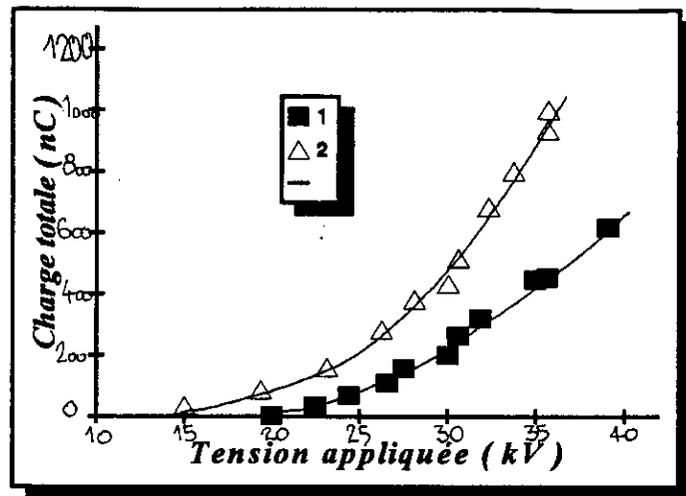
L'allure observée montre que la longueur l_f croît de manière plus que proportionnelle avec la tension .



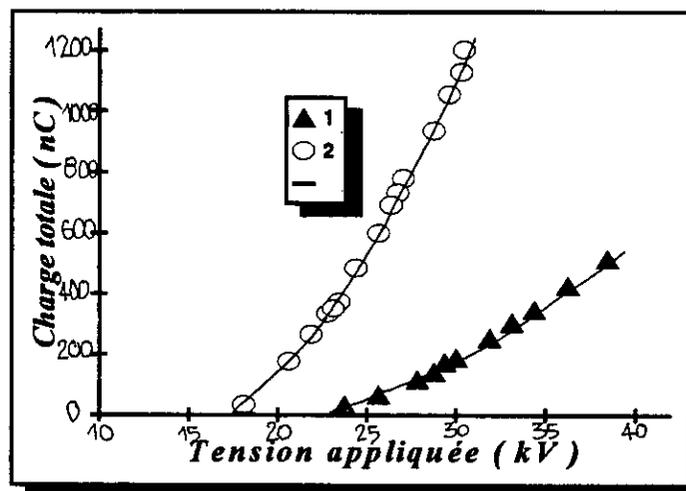
épaisseur : (1) : 3 mm - (2) : 5 mm - (3) : 10 mm .

Figure 21 : Longueur finale du streamer en fonction de la tension [21] .

Par ailleurs la figure 22 met en relief la relation qui existe entre la charge présente dans le diélectrique et la tension .



épaisseur : (1) : 9 mm - (2) : 5,5 mm
— courbe théorique



épaisseur : (1) : 5,5 mm - (2) : 2 mm
— courbe théorique

Figure 22 : Charge totale en fonction de la tension appliquée [21] .

La figure 23 représente quant à elle la variation de la vitesse de propagation du streamer en fonction de la tension appliquée .

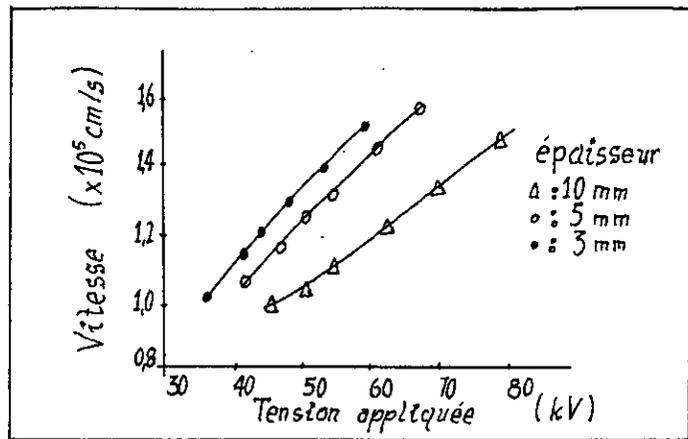


Figure 23 : Variation de la vitesse de propagation du streamer en fonction de la tension appliquée [21] .

Notons enfin que la vitesse de propagation des streamers , pour une isolation mixte , ne représente en géométrie pointe-plan que 55 à 77 % de celles des streamers dans un volume de liquide diélectrique seul .

1.5 : Phénomènes de polarisation :

Du point de vue électrique la matière a en général deux états : un état conducteur et un état isolant .

Dés le XVII^{ème} siècle , les conducteurs furent définis comme des corps pour lesquels des charges électriques créées par frottement se communiquent aux régions non frottées , entraînant le passage d'un courant plus ou moins fort .

Par contre , dans les isolants , les charges électriques ainsi créées restent localisées [1] .

Le modèle des bandes d'énergie établi aussi la différence entre ces deux états .

Par exemple pour les isolants , les électrons qui gravitent autour du noyau atomique , restent fortement liés à ce dernier [10] .

La transition des électrons vers les bandes de conduction est fortement liée à la température.

La conductivité σ peut être exprimée par : [10]

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(- W / (K_B \cdot T)) \quad (25)$$

Avec : T : Température absolue .

W : Energie d'activation du processus de transition .

K_B : Constante de **Boltzman** .

L'apparition des théories modernes (sur la structure de la matière) ayant permis de justifier le concept de polarisation de **Faraday** , a entraîné la distinction entre les isolants et les diélectriques , terme plus général réservé aux substances polarisables .

La polarisation est caractérisée par l'apparition de deux minces couches de charges électriques de signes opposés , chacune sur une face du matériau .

Constatant que lorsqu'un diélectrique remplace le vide entre les armatures d'un condensateur , ce dernier voit sa capacité s'accroître [1] , la notion de permittivité relative a été introduite .

Celle-ci appelée aussi constante diélectrique est, définie par :

$$\epsilon_r = c / c_0 = (\text{Capacité du condensateur comprenant le diélectrique entre ses armatures}) / (\text{ // / // // le vide // / // }) .$$

La permittivité ϵ du matériau vaut alors $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$ (ϵ_0 : permittivité du vide)

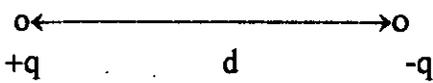
La séparation des charges positives et négatives ainsi produites (par polarisation) , entraîne l'apparition de dipôles électriques qui tendent à s'aligner dans la direction du champ électrique [10] .

Si des dipôles existent déjà dans le matériau , ils tendront aussi à prendre la direction du champ électrique à l'application de ce dernier .

Toutefois , un déphasage subsiste entre la direction du champ électrique et l'établissement des dipôles , entraînant une dissipation d'énergie , responsable des pertes diélectriques $\text{tg}\delta$; autre caractéristique du diélectrique [10] .

1.5.1 : Moment dipolaire et polarisation des diélectriques :

L'importance d'un dipôle électrique est mesurée par son moment dipolaire p :

$$p = q \cdot d$$


q : charge électrique d : longueur du dipôle .

Figure 24 : Représentation d'un dipôle électrique .

A l'échelle macroscopique , pour un volume dV , limité par une surface fermée assez grande pour contenir un nombre élevé de dipôles , nous définissons une densité volumique de moment dipolaire : $P = dp / dV$, dite aussi polarisation du diélectrique [1] .

En l'absence du diélectrique , pour les charges libres placées dans le vide , la loi de Gauss s'écrit [1] :

$$\oint_S \epsilon_0 \cdot E \cdot dS = \int_V \rho \cdot dV \quad \text{et} \quad D = \epsilon_0 \cdot E$$

ρ : densité de charges libres dans un volume délimité par une surface fermée S , et créant la ddp [20] , E le champ électrique et D l'induction électrique .

En introduisant le diélectrique dans ce même volume , des charges liées issues de phénomènes de polarisation s'ajoutent aux charges déjà citées [20] . La loi de Gauss s'écrit alors [1] :

$$\oint_S \epsilon_0 \cdot E \cdot dS = \int_V (\rho + \rho_p) \cdot dV \quad (26)$$

ρ_p désigne la densité volumique de charges liées .
La relation (26) peut s'écrire :

$$\oint_S (E \cdot \epsilon_0 + p) \cdot dS = \int_V \rho \cdot dV = \int_V D \cdot dS$$

La plupart des diélectriques ou isolants utilisés en électrotechnique sont homogènes linéaires et isotropes , dans ce cas il existe une relation simple entre p et E [1] :

$$P = \chi_r \cdot \epsilon_0 \cdot E \quad (\text{Cb/m}^2) = \epsilon_0 \cdot (\epsilon_r - 1) \cdot E \quad (27)$$

χ_r est appelée susceptibilité électrique [1] , et est aussi définie par : [20]

$$\chi_r = \text{Densité de charges liées} / \text{densité de charges libres} \quad (28)$$

A l'échelle moléculaire, le champ électrique local E_l induit un moment dipolaire élémentaire μ , ces deux grandeurs sont liées par [20] :

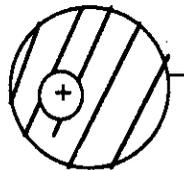
$$P = \chi_r \epsilon_0 E = N \cdot \mu = N \cdot E_l \cdot \alpha$$

Nous allons dans ce qui suit présenter les principaux types de polarisation .

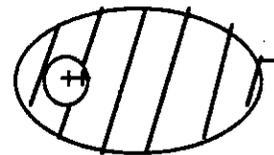
1.5.2 : Polarisation électronique :

A l'échelle atomique du diélectrique, sous l'effet d'un champ électrique, les électrons se déplacent par rapport au noyau. Il se crée ainsi des moments dipolaires induits, causes de la polarisation électronique. [20]

Son temps très court est de l'ordre de 10^{-5} secondes [1] .



Sans champ électrique



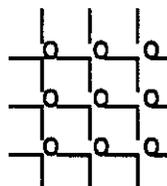
Après application d'un champ électrique E

Figure 25 : - Polarisation électronique -

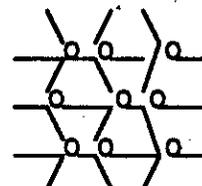
1.5.3 : Polarisation ionique :

Présente pour des cristaux ioniques, elle est due au déplacement en sens opposé des ions de signes contraires, sous l'effet du champ électrique. [10]

Son temps d'établissement est de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-13} secondes. [1]



E = 0



E ≠ 0

Figure 26 : - Polarisation ionique -

Notons que pour les deux types de polarisation déjà cités, la température est peu influente, il s'en suit que les pertes diélectriques ainsi causées ne sont pas importantes à fréquence industrielle [1].

1.5.4 : Polarisation par orientation :

En général, les molécules hétérogènes présentent un moment dipolaire dit spontané. Il est omniprésent, même en l'absence d'un champ électrique, l'orientation de ces dipôles est alors aléatoire [10].

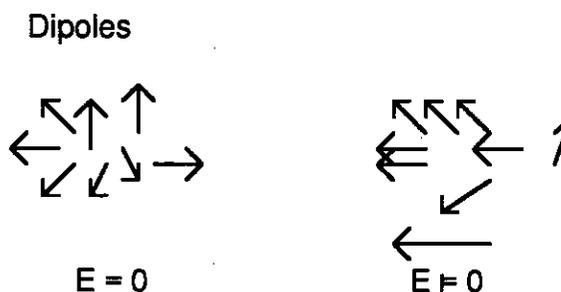


Figure 27 : - Polarisation par orientation -

Sous l'effet d'un champ électrique, ces dipôles s'orientent dans la direction du champ, donnant lieu à une polarisation par orientation [1].

Dépendant de la température, ce type de polarisation donne lieu à des pertes diélectriques significatives [10].

1.5.5 : Polarisation interfaciale :

Dans un diélectrique, il y a omniprésence de porteurs de charges. L'influence d'un champ électrique entraîne la migration de ces porteurs de charges vers les éventuels défauts existants dans le matériau [10].

En comparaison avec les types de polarisation cités précédemment, son temps d'établissement est assez long.

Maxwell établit une théorie de l'absorption concernant les milieux diélectriques, à l'aide de deux propriétés considérées comme indépendantes : la permittivité et la conductivité.



Figure 28 : - Polarisation interfaciale -

Le phénomène d'absorption concerne les milieux hétérogènes constitués de deux diélectriques homogènes, de permittivité et de conductivité différentes, il est absent dans les milieux homogènes.

Ce phénomène peut aussi bien apparaître dans un milieu uni phasique (deux solides par exemple), que dans un milieu formé d'une phase solide et d'une autre liquide.

Etudions le cas de deux diélectriques de permittivité ϵ_{r1} et ϵ_{r2} , et de conductivité σ_1 et σ_2 , placés entre deux armatures d'un condensateur, auquel on applique un échelon de tension V_0 à un instant initial ($t = 0$).

- Au temps $t=0$, l'absence de charges piégées à l'interface entraîne :

$$D_1 = D_2 \Rightarrow \epsilon_1 \cdot E_1 = \epsilon_2 \cdot E_2 \text{ (Conditions de continuité, avec } \epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \text{)}.$$

- Durant l'établissement du phénomène, les courants de conduction i_{c1} et i_{c2} sont différents dans les deux couches, il apparaît alors une charge interfaciale Q_{12} .

Il s'en suit que durant la phase transitoire :

$$-D_1 + D_2 = Q_{12} \Rightarrow dD_2/dt - dD_1/dt = dQ_{12}/dt$$

D'après la définition même du courant de conduction :

$$dQ_{12}/dt = i_{c1} - i_{c2} \Rightarrow dD_2/dt - dD_1/dt = i_{c1} - i_{c2} \quad (29)$$

Le courant traversant chaque diélectrique s'écrira alors :

$$i_1 = i_{c1} + dD_1/dt \quad \text{et} \quad i_2 = i_{c2} + dD_2/dt$$

- A l'équilibre ($t \rightarrow \infty$), les courants de conduction seront égaux à :

$$i_{c1} = i_{c2} \Rightarrow \sigma_1 \cdot E_1 = \sigma_2 \cdot E_2$$

Il apparaît de ce qui précède que chacun des courants traversant les diélectriques possède deux composantes, tentons de les définir à travers l'exemple suivant [21]:

Exemple :

En prenant des épaisseurs égales pour les deux plaques $d_1 = d_2 = d$, les relations précédentes s'écrivent :

$$\text{- à } t = 0 \quad \epsilon_0 \epsilon_{r1} E_1 = \epsilon_0 \epsilon_{r2} E_2$$

$$\text{Par ailleurs :} \quad E_1 + E_2 = V_0 / d . \quad (30)$$

$$\text{D'où} \quad E_1 = (\epsilon_{r2} / (\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})) \cdot (V_0 / d)$$

$$\text{De la même manière nous obtenons : } E_2 = (\epsilon_{r1} / (\epsilon_{r2} + \epsilon_{r1})) \cdot (V_0 / d)$$

$$\text{- A l'équilibre} \quad i_{c1} = i_{c2} = \sigma_1 \cdot E_1 = \sigma_2 \cdot E_2$$

En vertu de la relation (30) :

$$\begin{cases} E_1 = (\sigma_2 / (\sigma_1 + \sigma_2)) \cdot (V_0 / d) \\ E_2 = (\sigma_1 / (\sigma_1 + \sigma_2)) \cdot (V_0 / d) \end{cases}$$

- Quant au régime transitoire, la combinaison des relations (29) et (30) implique les équations différentielles suivantes :

$$\Rightarrow \sigma_1 \cdot E_1 - \sigma_2 \cdot E_2 = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r2} \cdot (dE_2 / dt) - \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r1} \cdot (dE_1 / dt)$$

$$\Rightarrow \sigma_1 \cdot \epsilon_{r1} - \sigma_2 \cdot ((V_0 / d) - E_1) = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r2} \cdot (d((V_0 / d) - E_1) / dt) - \epsilon_0 \cdot \epsilon_{r1} \cdot dE_1 / dt$$

$$\Rightarrow (\sigma_1 + \sigma_2) \cdot E_1 + \epsilon_0 \cdot (\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}) \cdot (dE_1 / dt) = (\sigma_2 / d) \cdot V_0 \quad (a)$$

De manière analogue :

$$(\sigma_1 + \sigma_2) \cdot E_2 + \epsilon_0 \cdot (\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}) \cdot (dE_2 / dt) = (\sigma_1 / d) \cdot V_0 \quad (b)$$

La résolution de l'équation différentielle (a) donne :

$$E_1 = (\sigma_2 / (\sigma_1 + \sigma_2)) \cdot (V_0 / d) + K \cdot \exp(-t / \tau) \quad (K: \text{constante d'intégration})$$

Où $\tau = \epsilon_0 \cdot (\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}) / (\sigma_1 + \sigma_2)$, représente une constante de temps.

K est déterminée à partir des conditions aux limites , ce qui donne :

$$E_1 = (\sigma_2 / (\sigma_2 + \sigma_1)) \cdot (V_0/d) + (V_0/d) \cdot ((\epsilon_{r2}/(\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2})) - (\sigma_2/(\sigma_1 + \sigma_2))) \cdot \exp(-t/\tau)$$

Et donc finalement :

$$i_1 = i_{c1} + dD_1/dt$$

$$= (V_0/(d \cdot (\sigma_1 + \sigma_2))) \cdot (\sigma_1 \cdot \sigma_2 + ((\sigma_1 \cdot \epsilon_{r2} - \sigma_2 \cdot \epsilon_{r1})/(\epsilon_{r1} + \epsilon_{r2}))^2) \cdot \exp(-t/\tau)$$

De cette dernière relation , nous pouvons conclure que le courant i_1 est composé d'un courant de conduction et d'un courant d'absorption qui décroît exponentiellement .

CHAPITRE 2
POLYMERES ET POLYMERISATION

Généralités :

Les polymères sont des matériaux largement utilisés en technique de haute tension , en remplacement progressif d'autres isolants solides autrefois utilisés , tel que le papier imprégné .

La polymérisation est l'action de créer une macromolécule à l'aide de plusieurs molécules identiques dites motifs monomères [22] .

La science des polymères a donc été développée dans le but d'obtenir de nouveaux matériaux , avec des propriétés diélectriques ainsi qu'une résistance à la température et à l'humidité améliorées .

2.1 : Classification des polymères :

Cette classification peut se faire en se basant sur :

- 1- L'origine du polymère .
- 2- La structure chimique des motifs .
- 3- La géométrie de la macromolécule .
- 4- Le type d'architecture ou d'isométrie du polymère .
- 5- Le type de polymérisation utilisé .

2.1.1 : Origine des polymères :

Nous distinguons les polymères naturels et synthétiques .

a/ Les polymères naturels :tels que le bois , le coton , le cuir , la laine , le caoutchouc et la soie .

La soie et le papier imprégné sont les plus utilisés pour des isolations électriques [23] .

b/ Les polymères synthétiques : appelés aussi résines synthétiques , du fait des similarités observées entre leur structure et celle de la résine naturelle (carbure naturel d'hydrogène oxygéné) .

Ils sont obtenus après réaction chimique provoquée , à partir de matériaux naturels .

2.1.2 : Structure chimique des motifs :

Suivant que la structure chimique du motif principal du polymère comprenne un ou plusieurs types de monomères , on distingue les homopolymères et les copolymères [5.b].

2.1.3 : La géométrie de la macromolécule :

La géométrie de la macromolécule peut être caractérisée par l'ordre atomique de celle-ci et la distribution des liaisons atomiques le long de la chaîne .

En considérant l'ordre atomique le polymère peut être soit amorphe soit cristallin :

a/ Polymère amorphe : L'absence d'ordre moléculaire à grande distance caractérise ces polymères [25] .

Les atomes sont désordonnés le long de la chaîne du polymère [23] .

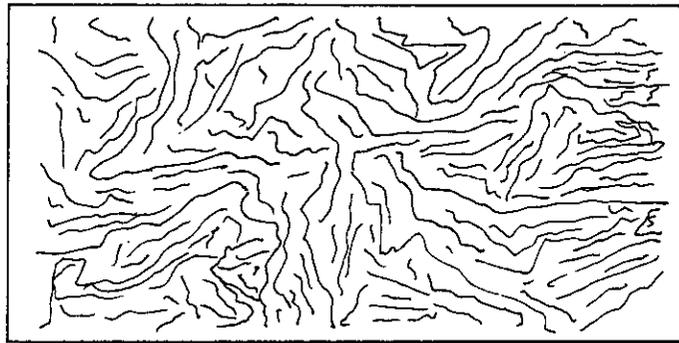
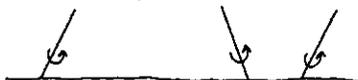


Figure 29 : *Structure des polymères amorphes*[23]

Les agitations thermiques , suite à une augmentation de la température , modifient les liaisons inter atomiques , par rotation ou froissement de celles-ci le long de la chaîne du polymère [23] .

Le mouvement moléculaire élémentaire est la rotation de la molécule ou d'une partie de celle-ci , autour des liaisons simples (les liaisons multiples sont rigides) .

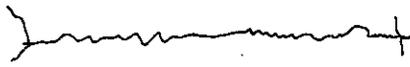
Les rotations possibles sont : [25]



1- Rotation des groupes latéraux



2 - Rotation de courts segments de chaînes
(quelques unités monomères)



3 - Rotation coordonnées sur de longs segments de chaînes .
(plusieurs dizaines d'unités monomères)



4 - Mouvement des chaînes entières les unes par rapport aux autres .

Chaque état est caractérisé par son énergie d'activation E_T et son temps de corrélation .

Lorsque la température augmente , le polymère amorphe passe de l'état vitreux (solide) à l'état élastique et enfin à l'état de fluidité .

Le temps de relaxation est le temps que met le polymère pour retrouver son état initial vitreux , à partir de l'état élastique , la température correspondante à cette transition est dite " - de vitrification " [23] .

La température qui permet le passage du polymère de l'état élastique à l'état de fluidité et vis versa est dite " - de fluidité " . Cette transition fait disparaître certaines liaisons intermoléculaires , ce qui entraîne le passage d'une partie de la chaîne vers une autre .

b/ Polymère cristallin : Suite à certaines conditions (refroidissement lent après fusion , refroidissement , régularité structurale) les polymères peuvent posséder une structure semi-ordonnée et donc donner lieu à une cristallisation partielle , il s'agit donc plutôt de polymères semi-cristallins [25] .

Leur structure générale possède en suspension des cristallites à un certain taux . Il est donc nécessaire d'introduire la notion de " taux de cristallinité " pour ces polymères .

Ce taux représente une fraction molaire des unités monomères présentes dans la phase cristalline [25] .

La présence de deux phases (cristalline et amorphe) montre qu'il faut considérer pour ces polymères , la température de vitrification (phase amorphe) et la température de fusion (phase cristalline) [23] .

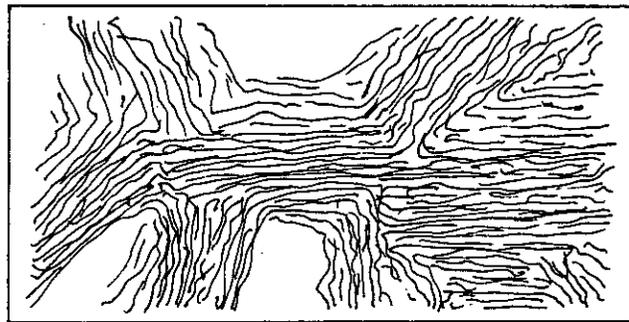


Figure 30 : *Structure des polymères cristallins [23]*

Dans la phase cristalline de ces polymères , les rotations ne sont pas possibles .

La deuxième distinction à faire dans cette classification concerne la distribution spatiale des liaisons le long de la chaîne , on parle alors de :

a/ Macromolécules linéaires :

Il peut s'agir d'homopolymères dont la répartition du motif monomère A est linéaire le long de la chaîne structurale [22] .

$\sim A-A-A \sim$ On le note $(A)_n$ ou n est le degrés de polymérisation .

C'est le cas du PVC ou du Polyéthylène [25] .

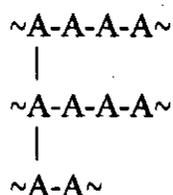
Il peut aussi s'agir de copolymères où la distribution des co-monomères le long de la chaîne structurale est linéaire [22] :

- Copolymères alternés : $\sim A-B-A-B-A-B \sim$
- Copolymères séquencés : $\sim A-A-A-A-B-B-B-B \sim$
- Copolymères statistiques : $\sim A-B-B-A-B-A-A-B \sim$

Notons que pour les polymères linéaires amorphes , la transition la plus importante est le passage de l'état vitreux 2 à l'état caoutchoutique 3 [25] .

b/ Macromolécules ramifiées :

Il s'agit toujours d'une structure planaire , mais dont la macromolécule est constituée de branches liées chimiquement .



L'absence de liaisons transversales dans la chaîne caractérise cette structure .

La ramification est parfois recherchée pour certains polymères , dans le but d'améliorer certaines propriétés thermomécaniques (mobilité) [22] .

c/ Macromolécules tridimensionnelles :

Pour des raisons de stabilité , certaines macromolécules ne peuvent prendre une structure planaire , des ponts transversaux de liaisons relient alors les diverses branches pour former une macromolécule géante tridimensionnelle [23] .



Les macromolécules peuvent être le fruit de la synthèse de monomères à plus de deux fonctions actives, ou par réaction d'un durcisseur avec un polymère linéaire [22].

La présence de liaisons transversales empêche les mouvements entiers des chaînes les unes par rapport aux autres [25]. Ce sont ces liaisons qui caractérisent l'élasticité du polymère.

De manière générale, dans cette classification, il nous reste à préciser les différences entre les élastomères et les plastiques.

Si à température normale, le polymère se trouve dans un état de haute élasticité, on parle d'élastomère [23].

Si par contre, avec l'augmentation de la température à partir de la normale, le polymère peut passer de l'état vitreux à l'état élastique, on parle alors de polymère plastique ou tout simplement de plastique [23].

Pour cette dernière catégorie, les matériaux qui retrouvent leurs propriétés initiales après plusieurs opérations de chauffage-refroidissement sont appelés thermoplastiques.

Ceux qui, par contre, redeviennent irréversiblement solides après un refroidissement, perdant ainsi leurs propriétés de fusibilité et de solubilité, sont appelés thermodurcissables [23].

2.1.4 : Le type d'architecture ou d'isomérisation du polymère :

L'isomérisation d'un polymère est relative aux caractères des corps isomères.
Les principaux types sont :

a/ Isomérisation de configuration :

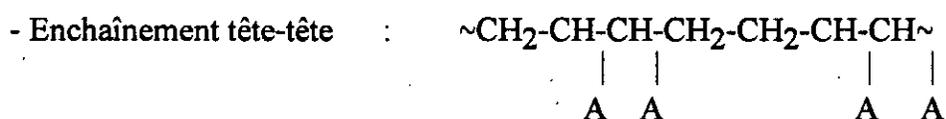
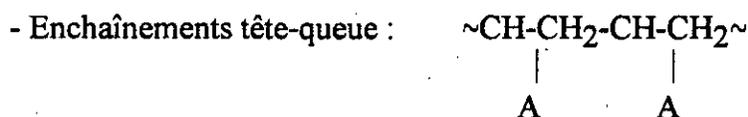
Il s'agit de polymères dont les isomères ont même composition chimique mais diffèrent soit par leur formule chimique, soit par la nature des liaisons inaltérables entre atomes [22].

Pour les polymères deux cas peuvent se présenter :

a.1/ Isomérisie de position :

L'enchaînement d'un substituant A le long de la chaîne se répète identiquement pour ce type de polymère [5.b] .

En prenant pour exemple le polyéthylène ($n(\text{CH}_2=\text{CH})$), les enchaînements classés sont :

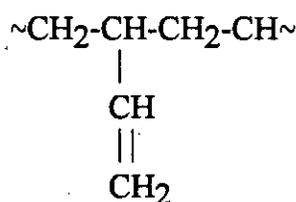


- Enchaînement mixte

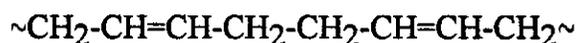
a.2/ Isomérisie de polymérisation :

Elle concerne surtout les configurations issues de la polymérisation de diènes conjugués .

- Configuration 1,2 : La double liaison se trouve sur la chaîne latérale [5] .



- Configuration 1,4 : La double liaison se trouve sur le chaîne principale [5] .



b/ Isomérisie stérique :

Elle concerne la régularité de répétition du centre d'isomérisie stérique le long de la chaîne du polymère , c'est à dire de la tacticité de ce dernier .

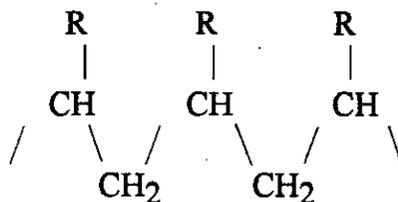
Le centre d'isomérisie stérique étant l'atome de carbone de la chaîne principale portant un substituant [5] .

Cette tacticité peut être assez parfaite , on parle alors de polymère holotactique ou eutactique [5b] .

Il s'agit par exemple des :

b.1/ Polymères isotactiques :

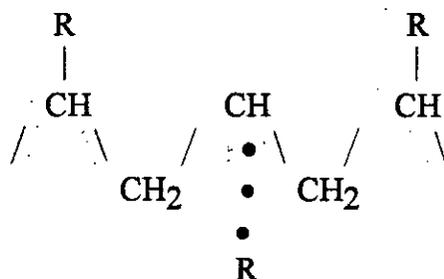
Lorsque la longueur du monomère correspond à celle du motif de répétition global [5.b] , et lorsque tous les substituants (groupements latéraux) R sont situés du même coté du plan [25] .



La présence de substituants volumineux dans la chaîne [5b] , ou de groupes latéraux polaires (entraînant une répulsion électrostatique [25]) , fait que ces chaînes de polymères adoptent une structure tridimensionnelle hélicoïdale .

b.2/ Polymères syndiotactiques :

Lorsque les substituants R sont successivement alternés le long de la chaîne [25] .



La totalité des rotations autour des doubles liaisons carbonées s'effectuent dans un plan , cette structure est aussi dite " planaire en zigzag " [5.b] .

Les polymères stéréoréguliers cités précédemment peuvent généralement cristalliser [5b] (l'établissement des chaînes les unes sur les autres est assez ordonné) .

Les polymères ou les deux structures co-existent sont dits hétérotactiques [5] .

Lorsque cette hétérotacticité est prononcée , on parle alors de polymères atactiques , qui du fait de leur irrégularité structurale ne peuvent cristalliser .

2.1.5 : le type de polymérisation utilisé :

Le type de polymérisation ayant permis l'obtention du polymère en question peut servir au besoin à le classer . Cependant , vu qu'un même polymère peut être obtenu par

divers procédés, ce critère est assez peu sélectif.

Nous présenterons dans la section 2.2 les principaux types de polymérisation.

2.2 : Procédés de polymérisation :

La distinction entre les différents types de polymérisation se fait essentiellement à la base des réactions chimiques mises en jeu.

a°/ Réaction de polycondensation :

Les macromolécules sont obtenues par condensations successives des fonctions portées par des macromolécules polyfonctionnelles (fonctionnalité ≥ 2).

Un simple chauffage ou l'utilisation de catalyseurs permet ce type de réaction.

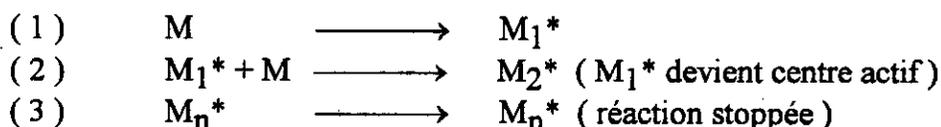
La condensation est progressive. On passe théoriquement des molécules monomères, puis aux molécules polymères formées et enfin à la macromolécule [5].

b°/ Réaction de polyaddition :

Durant cette réaction en chaîne, à une molécule monomère M , s'ajoute un centre actif de la chaîne macromoléculaire en cours de formation.

Elle s'amorce lorsque la macromolécule du monomère se transforme en centre actif, qui peut être radicalaire, cationique ou anionique.

La progression se fait par la production de nouveaux centres actifs et est stoppée à la dispersion de ces derniers [5.b].



De ces deux types de réactions résultent les procédés suivants :

2.2.1 : Polymérisation en masse :

Le système réactionnel comprend soit le monomère pur avec son seul système catalytique (polyaddition), soit de deux monomères fonctionnels A-A et B-B s'il s'agit d'une polycondensation.

La méthode permet d'obtenir des masses moléculaires élevées, indispensable aux bonnes propriétés mécaniques [5].

2.2.2 : Polymérisation en solution :

En plus du monomère et du catalyseur , le système réactif comprend un solvant qui permet essentiellement le dégagement thermique lors de la réaction [5.b] .

2.2.3 : Polymérisation en suspension :

Dans ce cas le polymère est insoluble dans un milieu dispersant tel que l'eau . L'amorceur n'est soluble que dans le monomère , chaque gouttelette de la suspension peut être considérée comme un système isolé de polymérisation en masse [22] .

2.2.4 : Polymérisation en émulsion :

Le monomère presque insoluble dans le milieu dispersant est maintenu sous forme d'émulsion micellaires , grâce à un agent tensioactifs et à une agitation énergétique .

Cette fois le système catalytique est soluble dans l'eau et non plus dans le polymère . Précisons enfin , qu'en plus de son composé de base , le polymère contient certains adjuvants .

Les adjuvants , produits organiques en général , modifient les propriétés physiques ou chimiques du polymère .

Nous pouvons citer le cas des plastifiants , qui en détruisant certaines des chaînes du polymère , permettent d'obtenir une structure plus souple et flexible [24] .

Quant aux stabilisants , ils permettent d'inhiber certains processus responsables de la dégradation du matériau , lors de sa mise en oeuvre ou de son utilisation [25] .

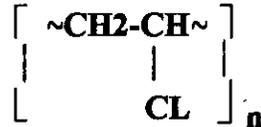
Il peut s'agir par exemple de stabilisants thermiques . Des colorants , des antistatiques . D'autres stabilisants peuvent composer le polymère .

Enfin des renforts sont rajoutés aux composés de base dans le but de consolider une configuration donnée . Toutefois , ce ne sont pas là les seuls additifs à la formule de base .

2.3 : Caractéristiques des polymères utilisés :

2.3.1 : PVC :

La formule générale du Polychlorure de Vinyle est :



Le PVC est obtenu par polymérisation en masse, en émulsion ou en suspension de chlorure de vinyle [22] .

Il fait partie de la classe des thermoplastiques, est essentiellement atactique donc amorphe. Son taux de cristallinité ne dépasse guère 10 à 15 % [25] .

Sa masse volumique est de 1,38 kg/cm³ .

Le procédé de polymérisation permet d'obtenir une poudre blanche de PVC .

Au composé de base qui est une résine de PVC on associe en général :

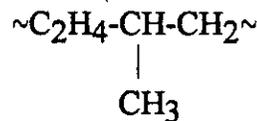
- Des plastifiants : utilisés dans le but d'abaisser la température de transition vitreuse du PVC (78 °C) et de le rendre souple .
Ils permettent aussi de faciliter la mise en oeuvre du produit .
- Des charges et renforts, essentiellement de la craie (jusqu'à 50 %), dans un but essentiellement économique . Toutefois, la craie améliore les pouvoirs isolants du polymère [23] . Notons qu'à l'ENICAB la charge utilisée est le ~~le Kaolin~~ *craie* .
- Des stabilisants thermiques qui permettent d'absorber le chlorure d'hydrogène, formé et dégagé lors de la chauffe du PVC .
- Des lubrifiants à base de Plomb .
- Des antistatiques et éventuellement des colorants .

Le PVC possède donc une excellente rigidité mécanique jusqu'au voisinage de sa température de transition vitreuse, de bonnes propriétés isolantes bien que ses pertes diélectriques soient assez élevées [25] .

2.3.2 : EPDM :

Le copolymère obtenu par réaction de concentrations égales d'éthylène et de propylène est désigné **EPR** (éthylène propylène rubber) [10] .

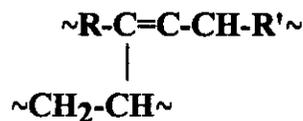
Sa formulation générale est :



L'absence de doubles liaisons montre la bonne résistance à l'oxydation du matériau .

En ajoutant à l'**EPR** une concentration de 2 à 3 % de **Diène** (Hydrocarbure possédant une double liaison) , on obtient de l'Ethylène Propylène Diène Modifié , l'**EPDM** [10] .

Sa formule générale est :



Ou R et R' sont des alkyles .

L'EPDM est un élastomère , obtenu par polymérisation en masse ou en émulsion .

Au composé de base d'EPDM (sous forme capsulaire) on rajoute lors de la mise en oeuvre du produit :

- Des plastifiants .
- Une charge (Craie) .
- Des antioxydants à base de Phénol .
- Un Système de réticulation qui contient un agent principal (un peroxyde) et un co-agent .

Sa température de transition vitreuse est de -110 °C . Ceci explique son état caoutchou-tique à température ambiante [25] .

Il présente de bonnes propriétés isolantes et un faible facteur de pertes diélectriques $\text{tg}\delta$, ce qui le rend largement utilisé dans les isolations électriques .

CHAPITRE 3
ETUDE EXPERIMENTALE

Dans ce dernier chapitre, d'une part nous décrivons les dispositifs et techniques de mesure ayant permis la connaissance des caractéristiques des diélectriques utilisés ainsi que d'effectuer les divers essais de tenue diélectrique.

D'autre part nous présentons les résultats de notre étude expérimentale ainsi que les diverses analyses portées à ce sujet.

3.1 : Dispositifs et techniques de mesure :

La totalité des essais présentés ont été effectués à la section Contrôle Cable du Département Assurance et Qualité de l'ENICAB.

Le matériel électrique utilisé est constitué d'un pont de mesure TETTEX et d'un spintéromètre de type PGO.

3.1.1 : Pont de mesure TETTEX [26] :

Ce pont est destiné à effectuer des mesures diélectriques sur des éprouvettes de matériaux isolants liquides ou solides.

La cellule de mesure est un condensateur à anneaux de garde, permettant en outre de mesurer la capacité de l'échantillon utilisé et d'en déduire la constante diélectrique ainsi que la connaissance du facteur de pertes diélectriques ; qu'il s'agisse de diélectriques solides (figure 31) ou liquides (figure 32).

La présence de l'anneau de garde permet d'éliminer l'influence perturbatrice des capacités partielles sur le résultat de la mesure.

Les éprouvettes de PVC et d'EPDM, toutes fournies par l'ENICAB, sont au préalable découpées en disque de 80 mm de diamètre. Leur surface est ensuite nettoyée afin d'éliminer les éventuelles impuretés qui peuvent fausser le résultat de la mesure.

L'échantillon solide est ensuite placé entre les électrodes, sur lesquelles est exercée une pression dont l'ajustement se fait grâce à un jeu de poids.

Vu d'une part l'épaisseur relativement élevée des éprouvettes d'EPDM et d'autre part la dureté du PVC, nous avons jugé adéquat d'utiliser un poids de 9 kg.

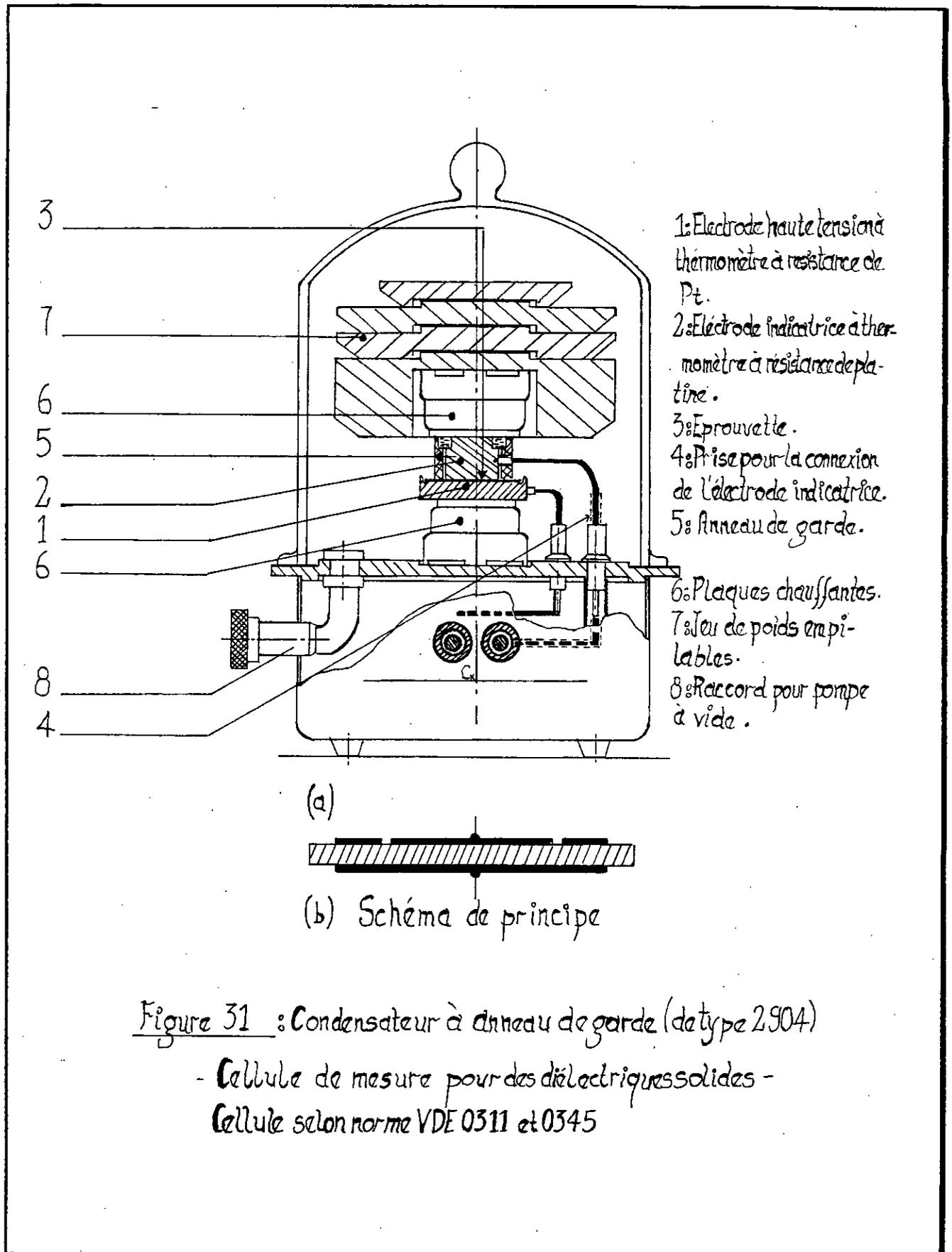


Figure 31 : Condensateur à anneau de garde (de type 2904)

- Cellule de mesure pour des diélectriques solides -
Cellule selon norme VDE 0311 et 0345

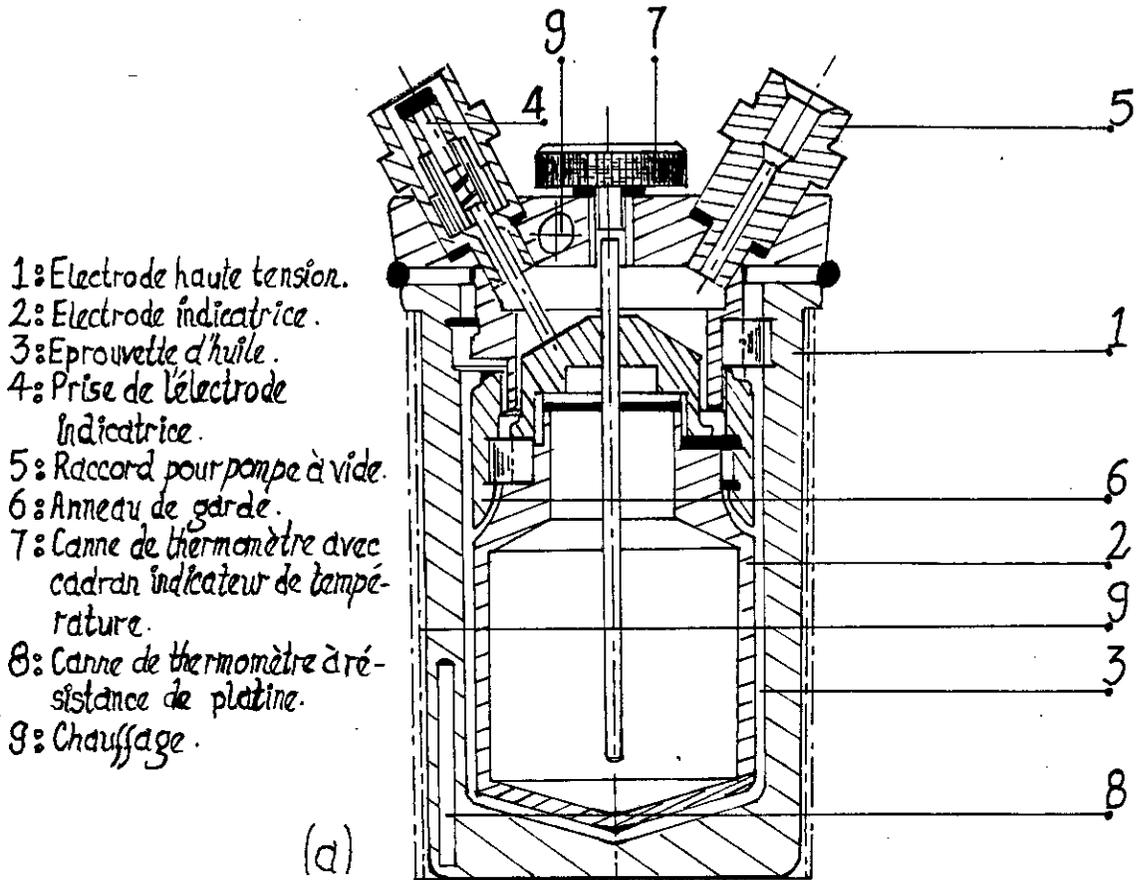
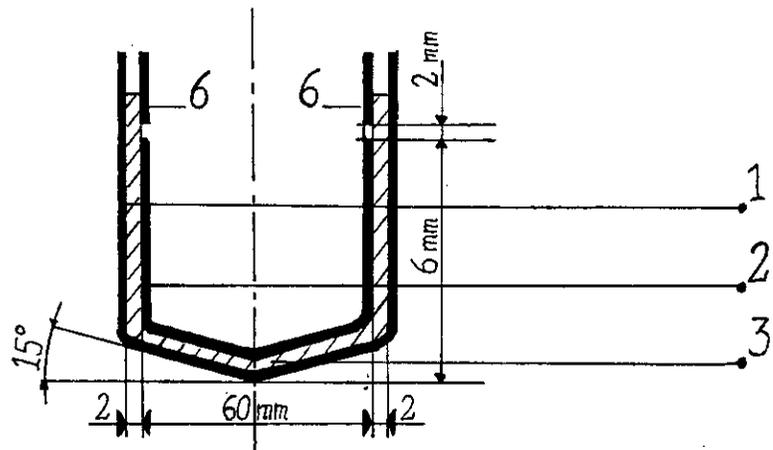


Figure 32 : Condensateur de type 2903 (Tattex)
 - Cellule de mesure pour diélectriques liquides -

Cellule selon norme
 VDE 0370



(b) Schéma de principe

La mesure est ensuite engagée . Le niveau de tension appliquée est de 500 V (Norme CEI / Publi.156 . 1963 et VDE 0370/10.66) . Le réglage du pont de mesure , de type TETTEX 2801 (pour solides) ; basé sur le principe de Shering ; peut alors être opéré .

La lecture du facteur de pertes diélectriques $\text{tg } \delta$ est directe . Alors qu'une deuxième lecture X permet de déduire la valeur de la capacité de l'éprouvette et donc de sa constante diélectrique ϵ_r .

$$C = 100 / X \quad (\text{pF}) \Rightarrow \epsilon_r = C \cdot 0,5647 \cdot e$$

e : étant l'épaisseur du diélectrique solide (en cm) .

Toutes les mesures sont faites à température ambiante .

Vu que le mode préparatoire des échantillons ainsi que les proportions des divers constituants sont très importants , nous avons jugé utile d'effectuer ces mesures pour chaque éprouvette utilisée .

Une autre raison à cela est que nous voulions nous assurer que tous les échantillons d'un polymère utilisé , aussi bien pour le PVC que pour l'EPDM , étaient identiques afin que nos essais, tout au long de ces mois d'étude , soient reproductibles .

Le résultat de ces mesures sont :

PVC : pour une épaisseur moyenne de 1,9 mm .

$$\epsilon_r = 4,22 .$$

$$\text{tg}\delta = 676,2 \cdot 10^{-4}$$

EPDM : pour une épaisseur moyenne de 5,5 mm .

$$\epsilon_r = 3,54 .$$

$$\text{tg}\delta = 43,6 \cdot 10^{-4} .$$

Notons qu'en remplaçant la cellule utilisée pour les solides par celle destinée aux diélectriques liquides , nous pouvons relever de la même manière les caractéristiques de l'huile employée lors des essais de tenue diélectrique .

BORAC 22 : (huile de transformateur)

$$\epsilon_r = 2,22 .$$

$$\text{tg}\delta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ à } 500\text{V} .$$

$$\text{Rigidité diélectrique : } E = 30 \text{ kV/cm} .$$

3.1.2 : Spintérmètre [27] :

Les spintérmètres sont destinés à effectuer des essais de tenue diélectrique des isolants . L'appareil utilisé à l'ENICAB est de marque BAUR , de type PGO à tension alternative (figure 33.a) .

Le niveau de tension nominal délivré est de $90 \text{ kV}_{\text{eff}}$. La montée en tension se fait grâce à une carte métallique perforée , par pas de 2 kV/s , jusqu'au claquage du diélectrique en essais . Toutefois il est possible de stopper la montée en tension à un niveau voulu en actionnant la marche semi-automatique de l'appareil .

Pour l'essai de diélectriques liquides (ou d'interfaces) , une pompe d'homogénéisation équipe le spintérmètre . Celle-ci permet d'homogénéiser le liquide en essais et d'éliminer les éventuelles bulles d'air présentes dans le diélectrique .

Un jeu d'électrodes permet de diversifier la nature du champ électrique appliqué . Les caractéristiques des électrodes utilisées sont représentées à la figure 33.b .

Un couvercle en pléxiglass permet en premier lieu de protéger le manipulateur des risques de chocs électriques lors de la mise sous tension de l'appareil , en deuxième lieu de le laisser observer le système d'électrodes et le diélectrique (le bac dans lequel se trouve l'huile est lui aussi transparent (en verre)) .

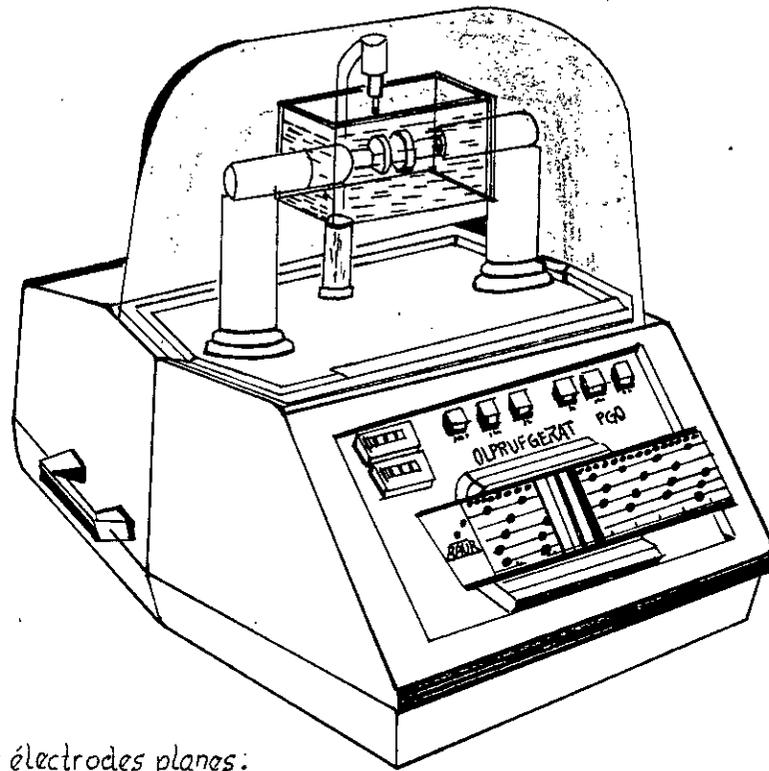
La procédure de l'essai diélectrique est la suivante (Norme CEI / Publi. 1956) :

- Le bac doit être lentement rempli d'huile , avec soin , afin d'éviter la formation de bulles d'air .
- Placer le diélectrique solide entre les électrodes et serrer celles-ci .
- Mettre en marche le spintérmètre et faire actionner la pompe durant 30 secondes .
- Couper la tension à la fin de l'essai .

Notons aussi que l'huile est changée après chaque claquage , ou après environ 10 essais sans claquage .

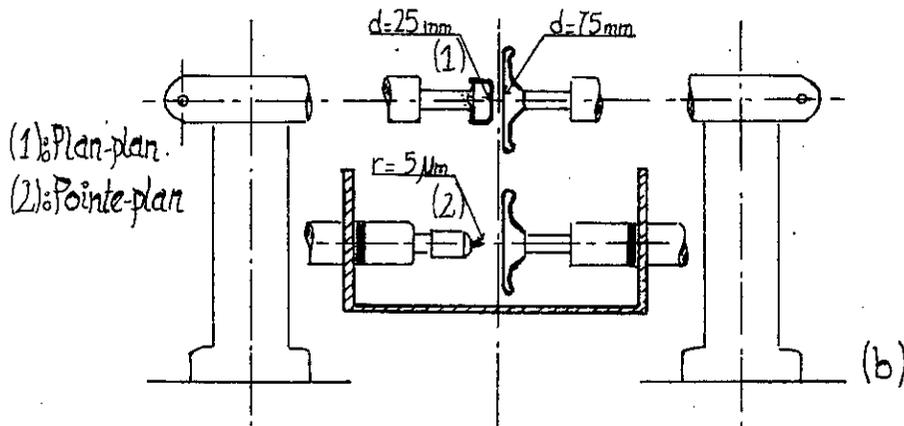
Avant chaque nouvelle série d'essais , les électrodes sont démontées puis nettoyées à l'acétone , leur état de surface est ensuite traité (polissage) .

Quant aux diélectriques solides ils ne sont évidemment utilisés qu'une seule fois .



(a)

d : diamètre des électrodes planes.
 r : rayon de courbure de la pointe.



(b)

Figure 33: Spintermètre -BAUR-(a) et forme des électrodes utilisées (b).

La mesure de la longueur finale du streamer (plus longue branche observée) se fait grâce à un microscope gradué (à 0,2 mm près) mis à notre disposition à l'ENICAB .

En effet lors d'une décharge électrique , le streamer laisse des traces sur le polymère (figures de Lichtenberg) (figure 34) .

3.2 : Etude de la propagation des streamers à l'interface (liquide/solide) isolants sous tension alternative 50 Hz :

Dans ce qui suit nous allons présenter le résultat de nos essais effectués , comme déjà cité , à l'ENICAB .

Les diélectriques solides utilisés sont le PVC et l'EPDM , dont les rigidités diélectriques valent respectivement 17 et 20 kV/mm .

Quant au diélectrique liquide utilisé , il s'agit de l'huile de transformateur BORAC22 , dont les caractéristiques ont été données au paragraphe précédent .

La moyenne de 5 relevés a été requise (Norme CEI 60 /publi 1963) pour chaque essai effectué .

On appellera longueur finale du streamer , celle correspondant à la plus longue branche observée sur les figures de Lichtenberg (sur les polymères) .

3.2.1 : Influence de la durée d'application de la tension et de la forme des électrodes :

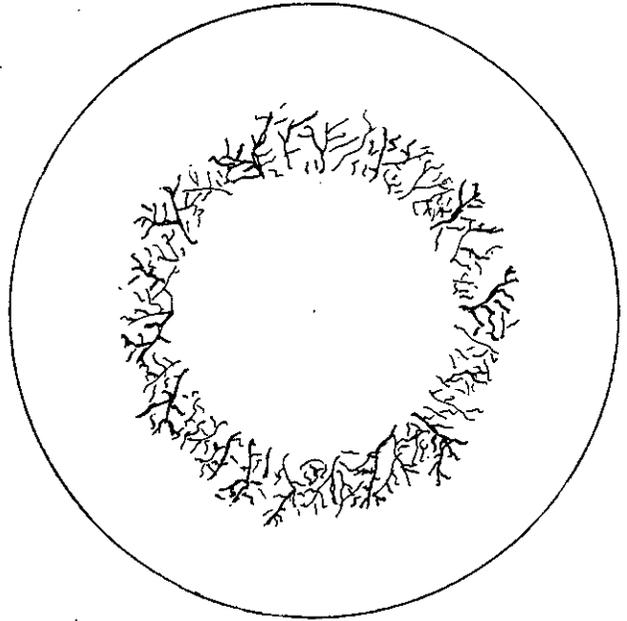
Pour cette étude nous avons utilisé des échantillons de PVC (épaisseur 1,9 mm) et d'EPDM (épaisseur 5,5 mm) .

Les figures I et II illustrent les variations de la durée de temps nécessaire à l'établissement de la décharge finale (disruptive , correspondant au contournement du diélectrique solide) en fonction du niveau de tension appliqué .

Ces figures montrent l'importance de la durée d'application de la tension sur le phénomène de propagation des streamers , donc sur le contournement du polymère solide .

Pour une épaisseur donnée de l'échantillon d'EPDM (figure I) , la durée de temps nécessaire au contournement diminue lorsqu'augmente le niveau de tension appliqué .

(a) : Géométrie plan-plan
des électrodes.



(b) : Géométrie pointe-plan
des électrodes.

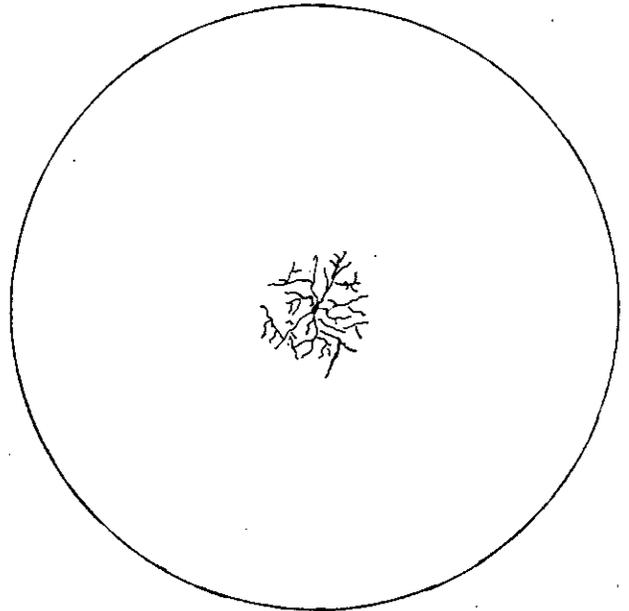


Figure 34 : Trace du streamer sur le polymère
(Figures de Lichtenberg observées)

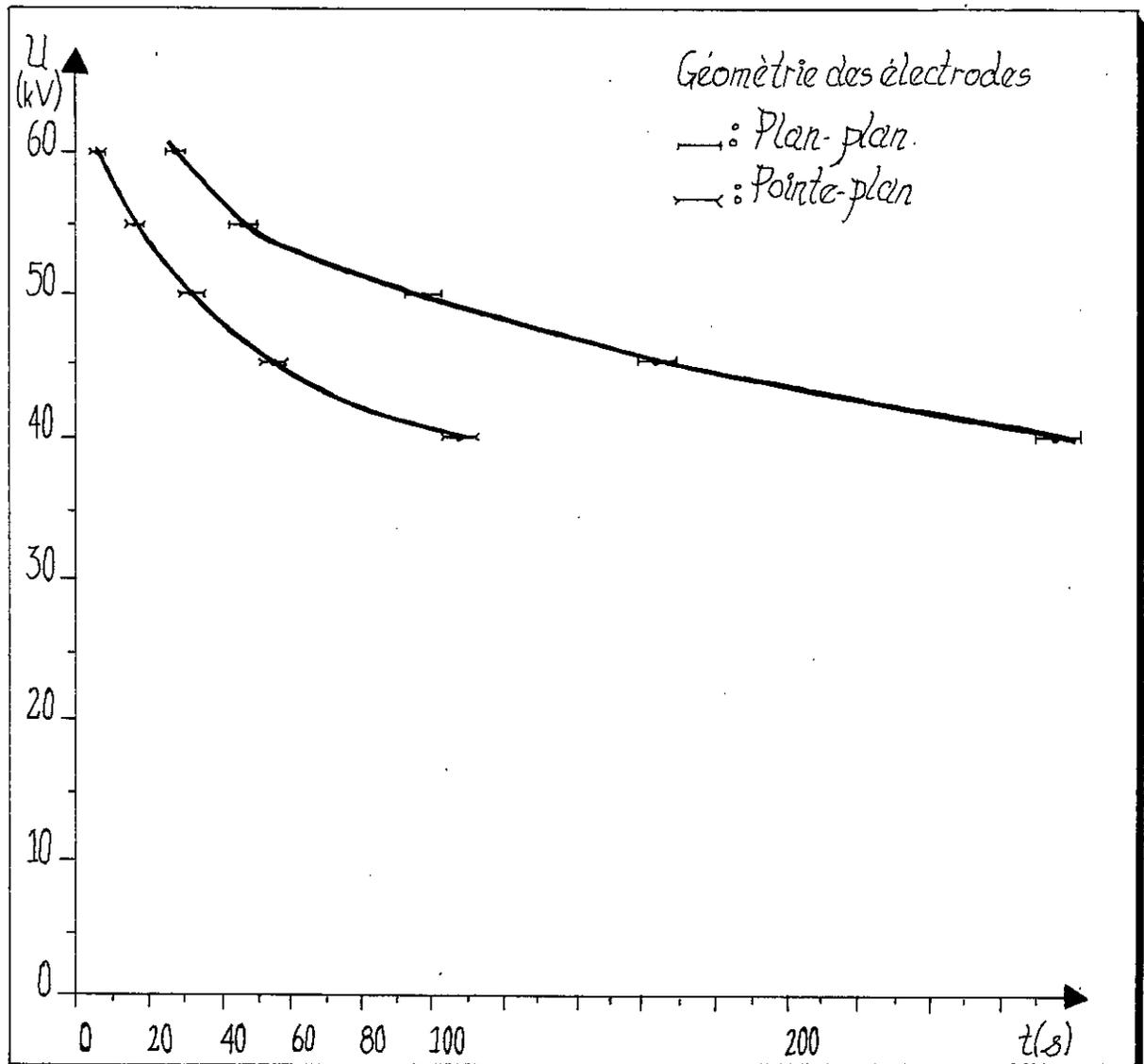


Figure I : Variation du temps d'établissement de la décharge disruptive en fonction de la tension pour une interface Borac22/EPDM.

Etude de la propagation des streamers aux interfaces Liquides isolants / Polymères solides

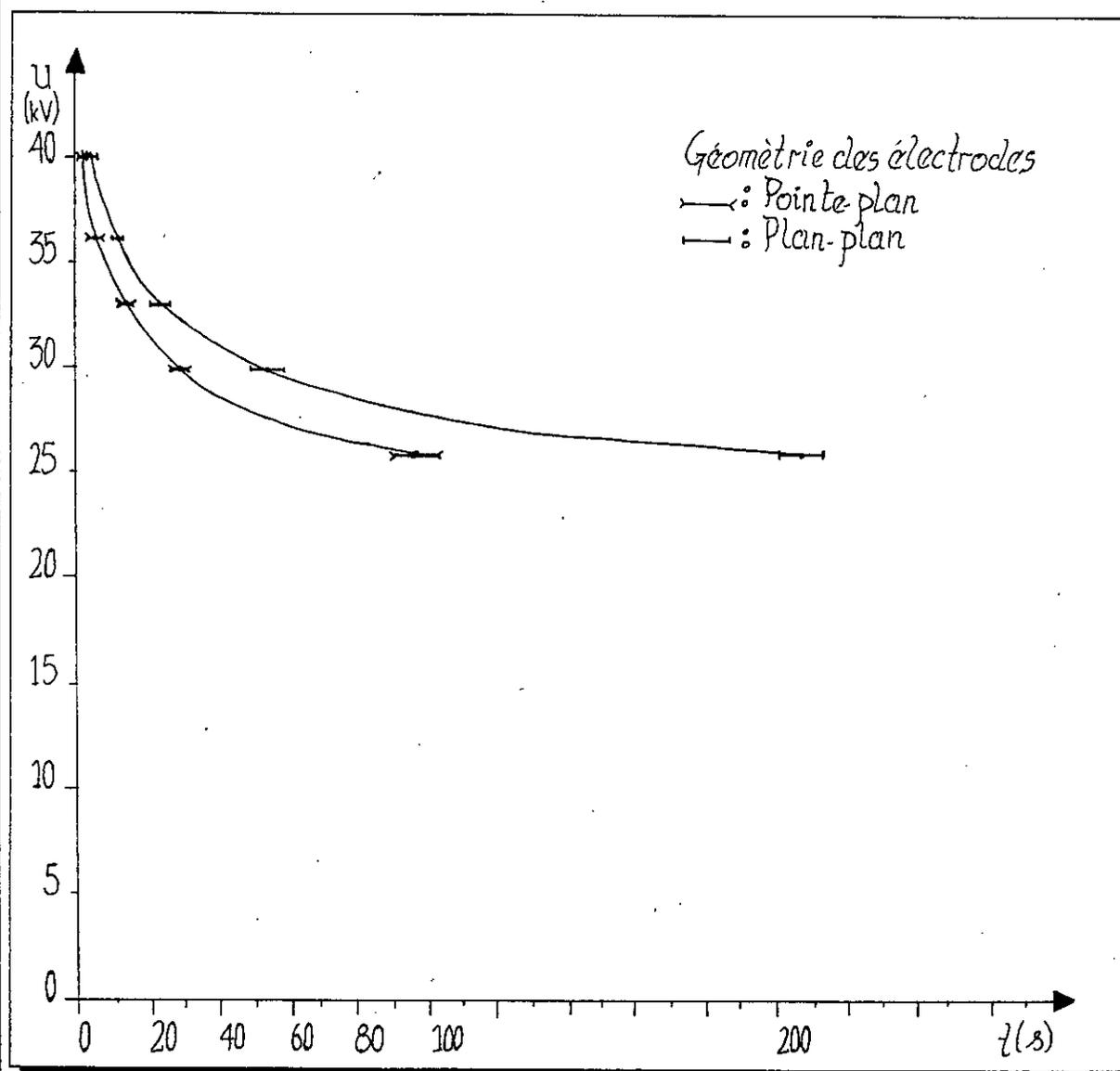


Figure II : Variation du temps d'établissement de la décharge disruptive en fonction de la tension, pour une interface Borac 22/PVC.

Cette relation entre le temps de contournement de l'isolant solide et la tension semble suivre une allure exponentielle .

Dans le même contexte , à tension donnée , la durée de temps sus-citée , diminue en passant de la géométrie plan-plan des électrodes à un système pointe-plan .

En effet , lorsque la tension augmente , la charge totale injectée dans le liquide croit de manière quasi exponentielle (Atten et Saker [18]) . Créant ainsi des chemins conducteurs de plus en plus long dans le liquide , ce qui rend de plus en plus probable le contournement du diélectrique solide .

De plus la vitesse de propagation des streamers s'élève proportionnellement à la tension (Devins et Al [17]) . La géométrie du diélectrique solide étant fixe , le temps établi entre la génération du streamer et le saut final diminue , lorsque la tension augmente .

En augmentant le niveau de tension , nous nous rapprochons du niveau disruptif des diélectriques . Le contournement du polymère devient quasi instantané pour une tension approchant 95 % du niveau disruptif .

Nous retrouvons les mêmes allures en remplaçant l'EPDM par le PVC , pour les deux géométries d'électrodes (figure II) .

En observant les figures I et II , nous pouvons remarquer l'importance de l'épaisseur de l'isolant solide utilisé , bien qu'il ne s'agisse pas du même polymère .

En effet , en ne se référant qu'aux valeurs assez proches des rigidités diélectriques respectives du PVC et de l'EPDM (17 et 20 kV/mm) , nous pouvons noter :

- Pour le PVC : temps de contournement relevé à 40 kV : 2,6" .
- Pour l'EPDM : ////////////////////////////////////// : 275,7" = 4' 35"7.

Ce qui est tout de même une remarquable différence . Par ailleurs cette remarque montre aussi l'importance des caractéristiques diélectriques intrinsèques du matériau choisi ($\text{tg}\delta$, ϵ_r)

3.2.2 : Influence de la tension et de la géométrie des électrodes sur la longueur finale du streamer :

Pour une manipulation assez aisée ; des relevés précédents , nous avons fixé le temps d'application de la tension à 5 secondes pour l'étude qui suit .

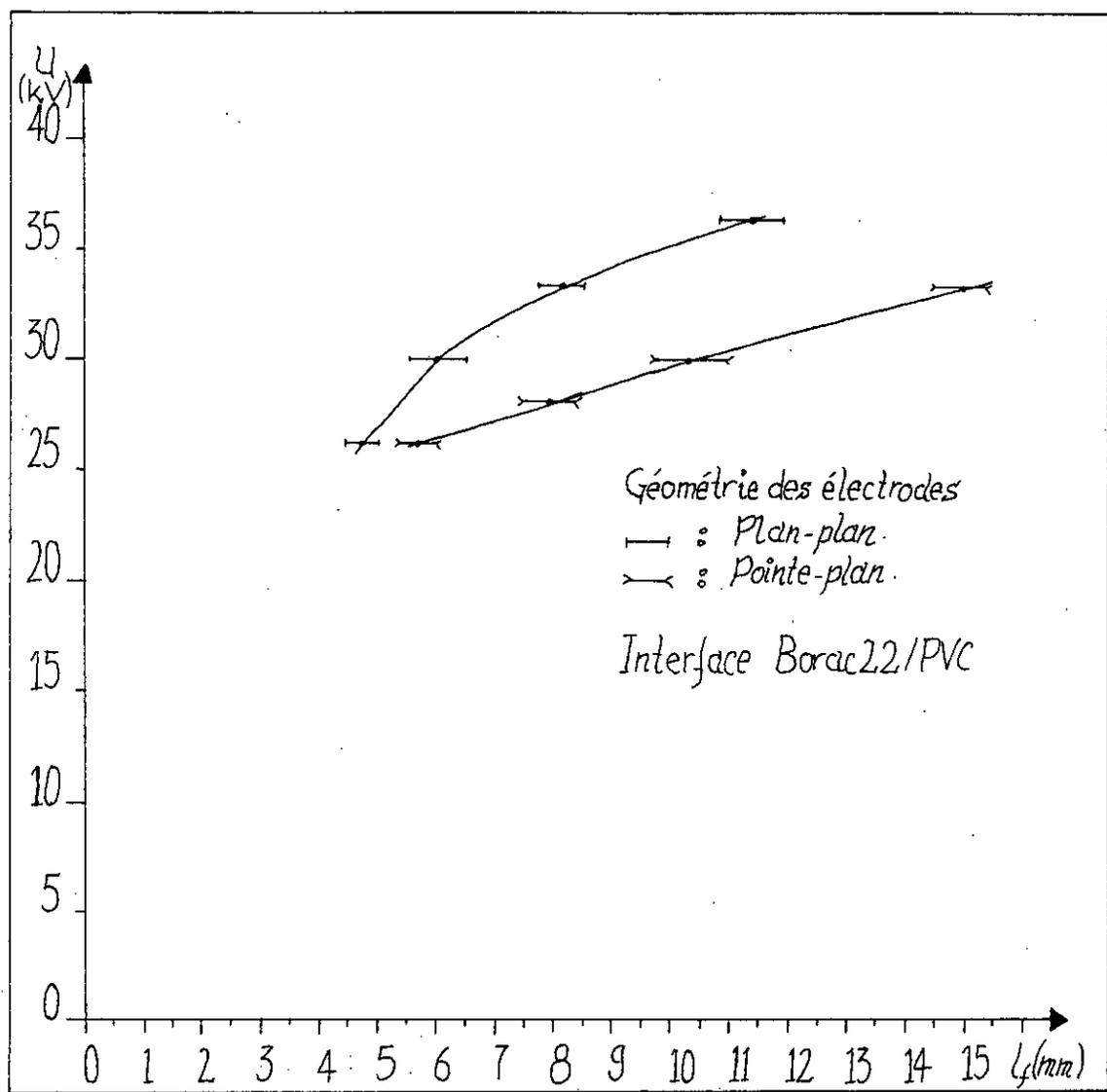


Figure III : Variation de la longueur finale du streamer en fonction de la tension, pour un temps d'application de celle-ci égal à 5 secondes.

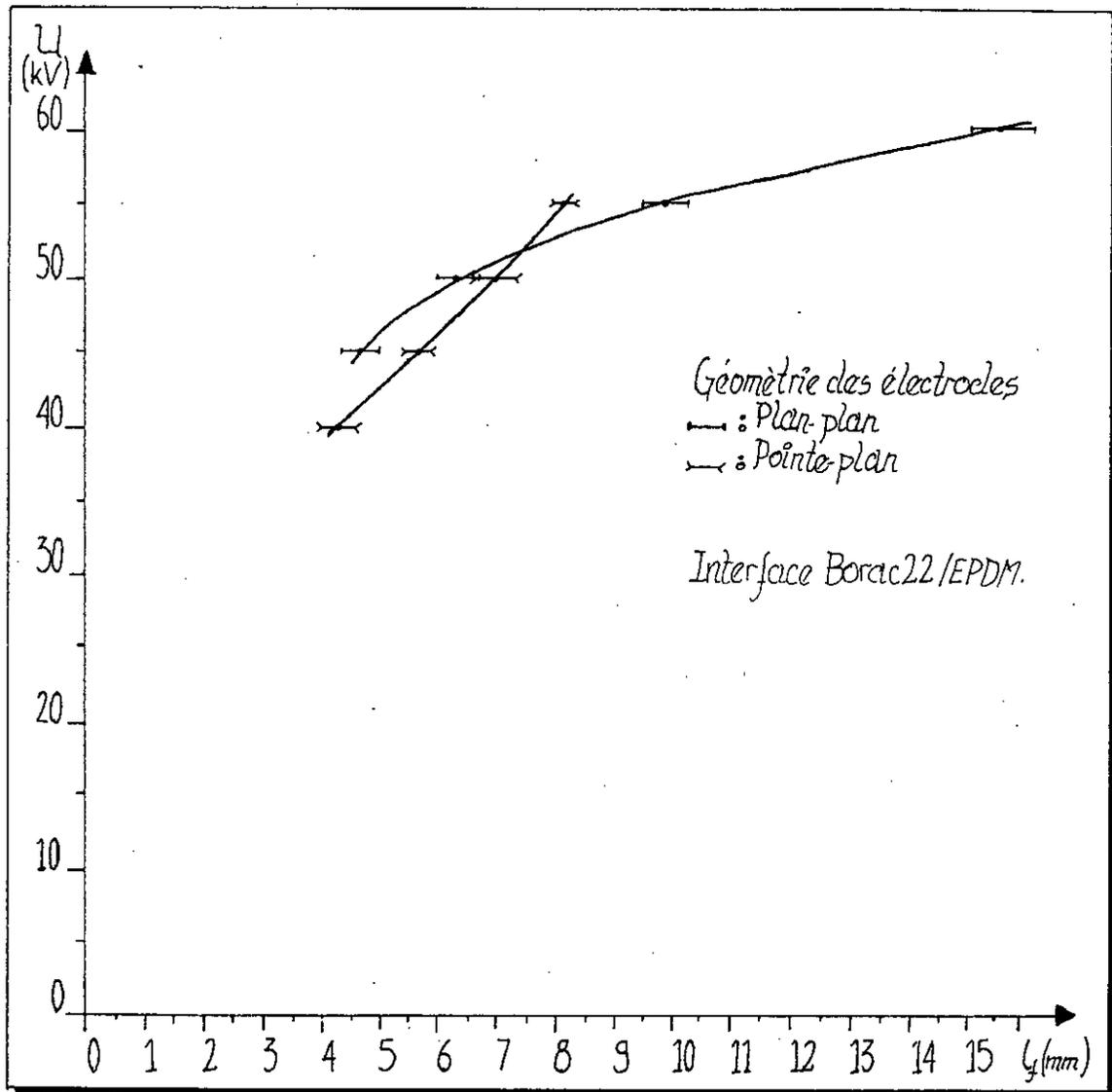


Figure IV : Variation de la longueur finale du streamer (l_f) en fonction de la tension, pour un temps d'application de celle-ci égal à 5 secondes.

3.2.3 : Influence de la durée d'application de la tension sur la longueur finale du streamer :

La figure V illustre les variations de la longueur finale du streamer en fonction du temps d'application de la tension , fixée à 26 kV , pour une interface Borac22 / PVC .

La courbe $l_f(t)$ relevée révèle que la longueur finale du streamer l_f augmente avec le temps d'application de la tension , pour un niveau fixé de celle-ci . Toutefois cette croissance tend à être limitée . Au bout d'un certain temps , après lequel il peut y avoir claquage , la longueur l_f tend vers une valeur limite .

Pour les deux géométries d'électrodes nous pouvons estimer le temps de saturation à environ 90 secondes (1'30") , ce qui laisserai le supposer indépendant de la géométrie des électrodes .

D'autre part , de la remarque précédente , les résultats obtenus laisse supposer que la vitesse de propagation des streamers augmente avec le temps d'application de la tension , sans toutefois dépasser une certaine valeur limite .

3.2.4 : Influence de l'état de pureté du diélectrique liquide utilisé :

Tout au long de notre étude , nous avons remarqué que la durée de temps laissée entre deux essais successifs était à priori assez importante .

Après avoir coupé la tension , le liquide met un certain temps pour , plus ou moins , retrouver son état initial (neuf , avant essais) .

Durant l'application de la tension , nous observons dans le liquide une turbulence plus ou moins importante selon le niveau de tension appliqué . Ceci correspond au mouvement électrohydrodynamique .

Les porteurs de charge ainsi créés ne disparaissent pas totalement immédiatement après l'interruption de l'application d'un champ électrique .

Nous avons alors jugé intéressant et utile de faire l'étude suivante .

En prenant pour exemple une interface Borac22/PVC , en géométrie pointe-plan des électrodes . Nous nous sommes fixé un niveau de tension égal à 28 kV , que l'on a appliqué à chaque relevé , durant 5 secondes .

Nous avons alors relevé les longueurs finales des streamers pour différents " temps de repos " de l'huile .

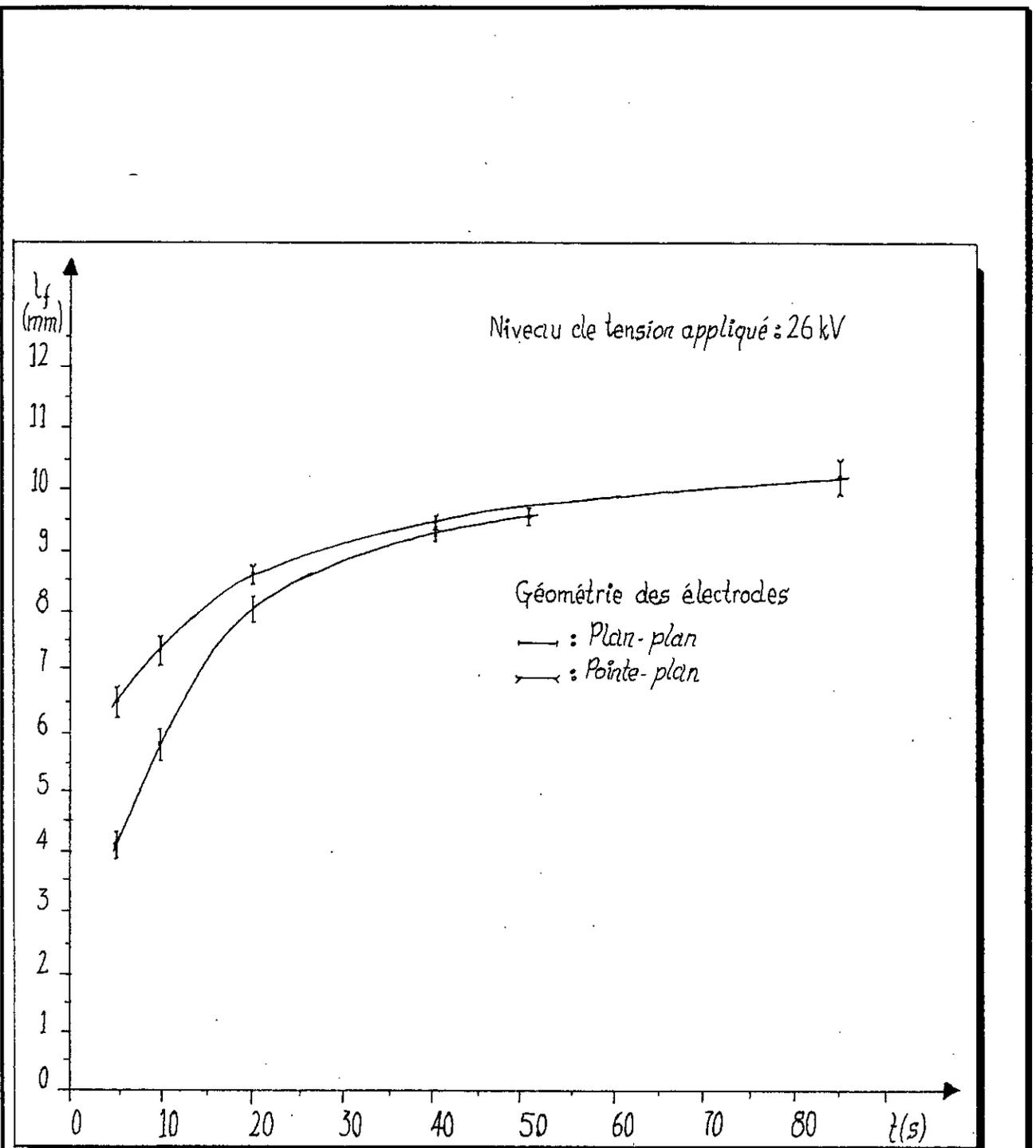


Figure V : Variation de la longueur finale du streamer en fonction de la durée d'application de la tension, pour une interface Borac22/PVC.

Ce temps de repos correspond à la durée de temps laissée entre deux essais successifs .

La figure VI reflète l'importance de ce temps . En effet , nous remarquons que , dans des conditions identiques , la longueur finale du streamer diminue lorsque la durée de temps en question est ralongée .

Cependant , cette même courbe , montre qu'il est inutile de laisser " reposer " l'huile indéfiniment . Au bout d'un certain temps , les porteurs de charges présents dans le liquide disparaissent presque totalement . Le liquide retrouve alors la presque totalité de ses pouvoirs isolants .

En se référant à la figure VI , nous pouvons évaluer le temps à laisser entre deux essais successifs ; dans le cas ou il n'y a pas nécessité de changer l'huile , à environ 20 minutes (pour une interface Borac22 / PVC) .

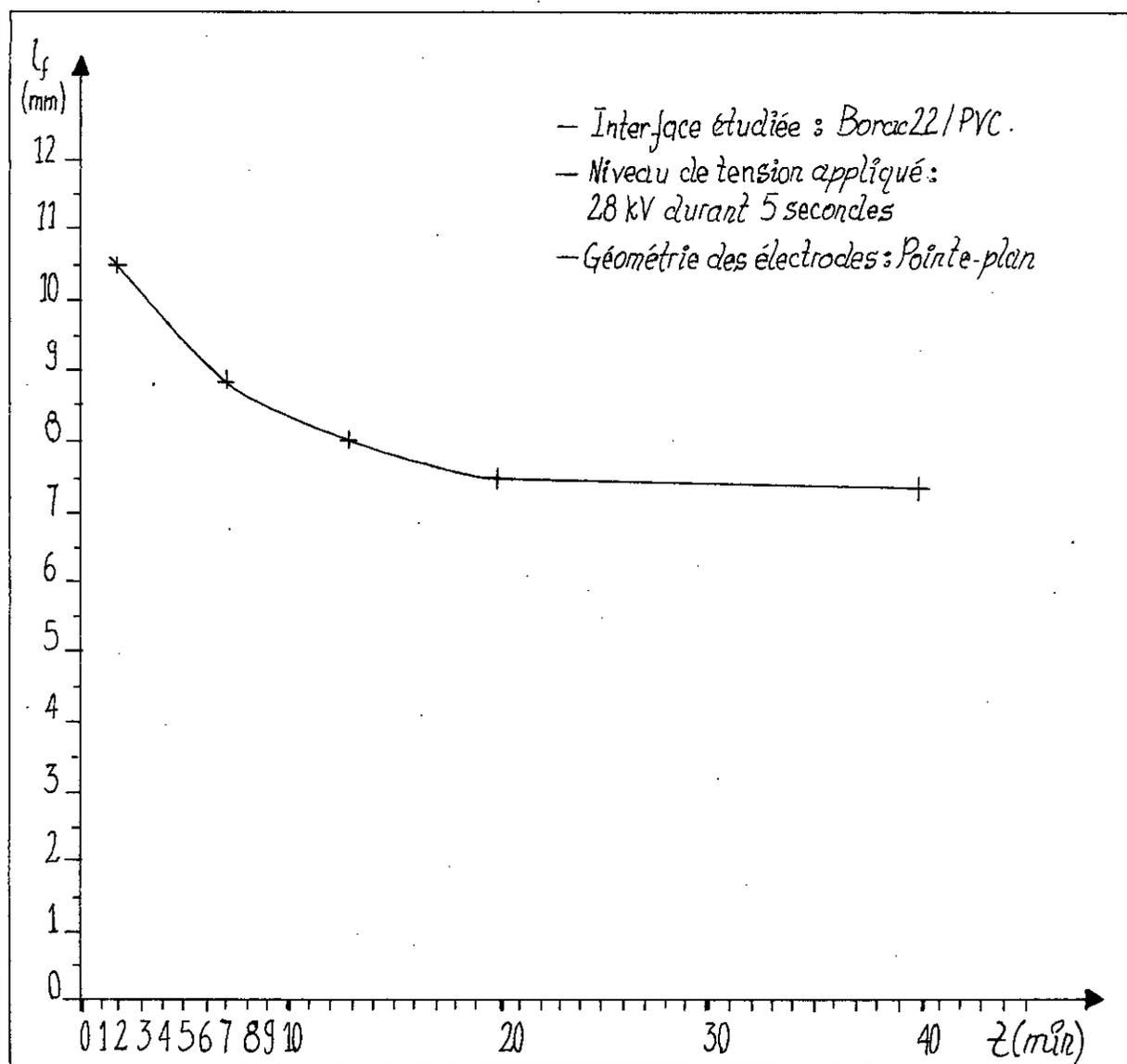


Figure II : Influence du temps de repos de l'huile (temps écoulé entre deux essais successifs) sur la longueur finale du streamer.

CONCLUSION :

L'objectif principal de cette étude fût d'établir le lien existant entre le temps d'application de la tension et la propagation des streamers à l'interface huile/polymère .

Notre étude a en outre montré que plus la tension est importante et plus le temps nécessaire à l'établissement de la décharge disruptive est raccourci .

Par ailleurs , nous avons pu constater l'importance de la nature du champ électrique appliqué entre les électrodes .

A tension donnée , plus le champ est non uniforme et moins est importante la durée de temps entre l'instant d'application de la tension et la rupture (décharge disruptive) .

Tout ceci a été observé pour les deux interfaces étudiées Borac22 / EPDM et Borac22 / PVC .

Nous pouvons aussi conclure que pour une interface Borac22 / PVC , la longueur finale du streamer augmente avec le temps d'application de la tension . Que celle-ci est plus importante en géométrie pointe-plan d'électrodes qu'en plan-plan ; sans toutefois dépasser une certaine valeur limite . Au bout d'un certain temps , la courbe $l_f(t)$ présente une asymptote horizontale .

Notons aussi qu'à temps d'application de la tension fixé , plus celle-ci augmente et plus est importante la longueur finale du streamer .

Néanmoins , nous ne pouvons pas généraliser , pour les deux interfaces étudiées , une relation établissant un lien entre la nature du champ électrique appliqué et la longueur finale du streamer .

Il est apparu deux zones dans la courbe $U(l_f)$ relevée pour l'interface Borac22/EPDM .

L'importance de la longueur finale du streamer , à temps d'application donné de la tension , dépendrait énormément de la nature des diélectriques présents à l'interface .

Par ailleurs , cette étude nous a montré l'importance de l'état de pureté du diélectrique liquide utilisé . Les impuretés contenues dans l'huile modifient les propriétés électriques du liquide et peuvent ainsi dévier de la réalité , les résultats obtenus .

A ce sujet une purification du liquide nous aurait permis d'espérer des résultats beaucoup plus rigoureux .

Toutefois ces résultats relèvent de la réalité pratique . En industrie , les liquides sont livrés dans cet état . Ceci fait que nos résultats sont , à notre avis , techniquement intéressants , car après tout , le domaine d'intérêt principal d'un ingénieur est la pratique .

Nous regrettons enfin , de n'avoir pas pu rapporter les deux dernières études (3.2.3 et 3.2.4) à une interface Borac22/EPDM .

Ceci aurait permis en outre de voir si la nature des polymères en contact avec l'huile influent sur son " temps de repos " .

Bien qu'à notre humble avis , ce temps paraît de prime à bord ne dépendant que de la nature de l'huile .

ANNEXE :

Relevé 3.2.1 : *Variation du temps nécessaire au contournement du diélectrique solide en fonction de la tension appliquée :*

PVC :

U (kV)	t (s)

Géométrie Plan-plan d'électrodes	

26	207,2
30	55,8
33	21,6
36	9,8
40	2,6

Géométrie Pointe-plan d'électrodes	

26	96,8
30	29,2
33	14
36	6
40	1,6

EPDM :

U (kV)	t (s)

Géométrie Plan- plan d'électrodes	

40	275,6
45	160,2
50	98,4
55	47,2
60	29,7

Géométrie Pointe-plan d'électrodes	

40	107,8
45	59,8
50	33,2
55	18,6
60	7,8

Relévé 3.2.3 : *Variation de la longueur finale du streamer en fonction du temps d'application de la la tension .*

PVC :	t (s)	l _f (mm)

Géométrie Pointe-plan des électrodes		

	5	6,45
	10	7,3
	20	8,55
	40	9,4
	85	10,2

Géométrie Plan-plan des électrodes		

	5	4,1
	10	5,95
	20	8,05
	40	9,35
	50	9,45

Relévé 3.2.4 : *Variation de la longueur finale du streamer en fonction du temps de repos de l'huile .*

PVC :	t (min)	l _f (mm)

Géométrie Pointe-plan d'électrodes		

	2	10,5
	7	8,85
	13	8,05
	20	7,45
	40	7,35

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] : R.Fournié : Les isolants en électrotechnique .
- Concepts et théories -
Edition EYROLLES 1986.
- [2] : N.Felici and J.C.Lacroix : Electroconvection in insulating liquids with special
reference to Uni - and Bi - Polar injection .
- A review of the research at the C.N.R.S laboratory of electrostatics .
Grenoble 1976-79
- [3] : I.Adamczewski : Les phénomènes d'ionisation et de conduction dans
les diélectriques liquides .
Adaptation Française : Mme A.Faucher .
Edition MASSON 1968
- [4] : Kind / Kärner : High-Voltage insulation technology .
Translated from the German by Y.Narayama Rao
Friedr. Vieweg & Sohn
Braunschweig / Wiesbaden 1985 .
- [5] : Techniques de l'ingénieur :
a: * D213 : Robert Fournié .
Diélectriques - Bases théoriques - 6/1986
* D225 : Robert Tobazéon .
Liquides diélectriques - Conduction électrique dans les liquides - 6/1984
b: * A3000 : Michel Chatain .
Plastiques - Avant propos - 2/1986 .
* A3040 : Michel Fontanille .
Plastiques - Structures macromoléculaires - 3/1975
* A3530 : Robert Tobazéon .
Essais normalisés - Essais électriques - 8/1985
- [6] : A.Saad : Conduction superficielle et volumique de films de polymères
en contact des liquides isolants .
- Thèse d'état physiques - Grenoble 1986 .
- [7] : T.R.Jow : The effect of liquid impregnants on solid polymeric dielectrics .
CEIDP , pp 636-642 , October 1990 .
- [8] : C.G.Garton : Proc . Inst . Elect . Eng . Vol 88 , p183 . 1941 .

- [9] : **N.Felici** : The investigations of solid dielectrics and methods of testing .
Politechniki wrolalawski n° 16 , 1977 .
- [10] : **Philippe Robert** : Traité d'électricité , matériaux de l'électrotechnique .Vol II .
Edition **Georgi** 1979 .
- [11] : **Felici , Garton and Tobazeon** : Physical factors affecting the behaviour
of systems impregnated with liquid of high permitivity dielectric .
- Materials measurements and application -
Conf. Pub. n°67 , July 1970 .
- [12] : **Gartner et Tobazeon** : Pertes non linéaires dans les diélectriques composites .
C. R. Académie Sc 274 , p274 , 1972 .
- [13] : **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 Es . Sciences Physiques . **Grenoble** 1986 .
- [14] : **R.J.Taylor** : The flashover of solid / liquid interface .
- Dielectrics materials , measurements and applications -
Conf. Pub. n°129 . 1975 .
- [15] : **W.Hauschild** : The flashover of inhomogeneous insulating arrangements
under transformer oil at switching voltages .
Elektrie 1971 , pp 177-180
- [16] : **R.J.Taylor** : Assesing the moisture barrier properties of polymeric coating
using electrical and electotechnical methods .
IEEE Trans. on Elect; Insul. Vol 24 n°5 . Octob. 1989 .
- [17] : **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 .
- [18] : **Atten et Saker** : Streamer propagation over liquid / solid interface .
10th International conference on conduction and breakdown in dielectrics liquid .
Grenoble . Sept.1990
- [19] : **A.Beroual** : Propagation des streamers dans les diélectriques liquides .
CR. Acad. Sc. Paris T 303 . Série II n°4 .1986 .

- [20] : **A.Von Hippel** : Les diélectriques et leurs applications .
Traduit par M.Sauzade .
Edition Dunod , Paris 1961 .
- [21] : **Z.Djemai** : Etude de la propagation des streamers à l'interface liquide-solide
sous tension alternative 50 Hz .
Thèse de Magister , ENP , 1991 .
- [22] : **F.Rocaboy** : Comportement thermique des polymères synthétiques .
- T.1 : Polymères à chaînes carbonées -
Edition Masson , Paris 1972 .
- [23] : **M.Mayofis** : Plastic insulating materials .
Translated by Scripta technica ltd .
London Iliffe books ltd . Princeton , New Jersey .
- [24] : **A.Jenkins** : Progress in polymer science .
Pergamon press . Oxford , 1967-1971 .
- [25] : **J.P.Trotignon , J.Verdu , M.Piperaud , A.Dobraczynski** :
Précis de matières plastiques .
- Structure-Propriétés , mise en oeuvre et normalisation -
Afnor - Edition Nathan 1984 .
- [26] : Tettex A.G. Instruments :
Condensateur à anneaux de garde de type 2903 et 2904 .
Description et mode d'emploi .
- [27] : Mode d'utilisation des spintermètres semi-automatiques " Baur " :
Halb-und Vaullotomatische .
Ölprüfgeräte 60-90 kV .