

RELATION ENTRE LES DECHARGES ELECTRIQUES ET LE CLAQUAGE DE FILMS DE POLYPROPYLENE DANS UNE STRUCTURE DE CONDENSATEUR TOUT-FILM IMPREGNE

Bibi J.P. ADOHI^{1*} et J.P. GOSSE²

¹Laboratoire de Physique de la Matière Condensée et de la Technologie, U.F.R.-
S.S.M.T, Université de Cocody, 22 B.P 582 Abidjan 22, (Côte d'Ivoire)

²Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques, C.N.R.S, Avenue des
Martyrs, 166X 38042 Grenoble Cedex (France).

(Reçu le 02-03-2003 – Accepté le 25-09-2004)

Summary : A new approach is proposed in the study of electrical breakdown mechanism of polypropylene films, in an all-film capacitor structure, impregnated with Jarylec C100 (a mixture of mono and dibenzyltoluene M/DBT), under AC voltage (50Hz) at ambient temperature.

First, three important parameters characteristic of electrical breakdown of the polypropylene films (delay-time to breakdown) and of the surrounding medium (charge and frequency of the discharges) were simultaneously measured and found correlated according to applied voltage amplitude. Then the craters formed when breakdown occurred were localised with respect to the edge of the electrodes. This study showed that two distinct types of discharges caused the breakdown of the polypropylene films. The characteristics of the breakdown at the transition between the two types of discharges (life-time of the material, charge and frequency of the discharges, voltage) were specified.

In a second set of experiment, the discharges were characterised. Their evolution on the voltage alternation was analysed and revealed the structure in burst of the second type discharges. The parameters of the bursts (total charge, reproduction frequency, number of impulses in a burst) were then determined. From the time evolution of the charges of the impulses and the time interval between two consecutive pulses, we identified the second type discharges with creeping streamers. From the extrapolation of some of the precedent parameters (number of impulses in a burst...) to voltages below the transition, we could identify the first type discharges with avalanches in the impregnating liquid.

* Auteur de correspondance

At last, we discuss the basic process of the breakdown of the polypropylene films due to these discharges according to actual knowledge on discharges.

Keywords: Electrical discharges, Impregnated polymers, Electrical breakdown, Streamers, Dielectric solids.

I - INTRODUCTION

Du fait des nombreuses pannes de condensateurs causées par le claquage des isolants dans l'industrie de fabrication des condensateurs et dans les machines électriques, le phénomène du claquage diélectrique a fait l'objet de plusieurs études^{[1],[2],[3]}. On sait en effet que ce phénomène dépend par exemple de la structure du système d'électrodes du condensateur, de la forme de la tension appliquée.... Ainsi, dans les condensateurs à film de polymère métallisé (condensateurs autocatrisables) par exemple, le claquage est initié soit aux interfaces entre le diélectrique et les électrodes métalliques, soit à l'intérieur du diélectrique à partir d'impuretés ou de défauts de fabrication, soit en volume dans le matériau par des phénomènes thermiques, électroniques ou chimiques^{[4],[5]}. Pour approcher le mécanisme physique de base du claquage, une démarche consiste à mesurer le temps de retard au claquage en fonction de différents paramètres (tension appliquée, température, épaisseur du matériau) et à confronter les résultats obtenus aux prévisions théoriques. Cette démarche a été utilisée pour étudier des films minces de polystyrène de quelques milliers d'Å d'épaisseurs^[6]. Dans la structure de condensateur tout-film, outre les phénomènes internes au matériau diélectrique, le claquage peut se produire en bordures d'armatures, dans la zone de renforcement du champ électrique, sous l'effet de décharges électriques dans le milieu environnant les électrodes. Aussi l'une des nouvelles techniques utilisées dans l'industrie de fabrication

de ce type de condensateur est de remplir le condensateur avec un liquide diélectrique (huile de transformateur, M/DBT, huile silicone...) qui ne produit des décharges qu'à des tensions élevées vis-à-vis de la tension applicable en service^[7]. La rigidité diélectrique est le paramètre le plus utilisé pour caractériser le claquage de ce type de condensateur. Des travaux effectués sur des films d'oxydes de polyphénylène typiquement de 3µm d'épaisseur, en géométrie sphère-plan, dans le M/DBT, en rampe de tension continue ont montré que la rigidité diélectrique est une fonction croissante de la pression hydrostatique du milieu environnant. Le claquage a alors été attribué à des décharges électriques dans le liquide d'imprégnation^[8]. De même il a été montré récemment dans les hydrocarbures liquides (cyclohexane...), en géométrie pointe-plan, sous impulsion de tension, que la tension d'apparition des décharges streamers croît avec la pression, mais que celle des décharges dues à des avalanches électroniques dans le liquide n'est pas affectée^[9]. Malheureusement, contrairement au cas des condensateurs à film métallisé, les schémas qui expliquent le claquage du matériau sous l'action des décharges n'ont pas reçu de formulation mathématique et il n'existe, à notre connaissance, aucun moyen de prévoir les paramètres caractéristiques du claquage (temps de retard, rigidité diélectrique...) à partir de ceux des décharges électriques (charge, fréquence...) et vice-versa ou d'identifier la nature des décharges qui sont à la base d'un claquage mesuré. Lors d'une étude des décharges qui surviennent dans un modèle de condensateur tout-film, isolé au polypropylène et imprégné de M/DBT, en tension alternative (50Hz), des claquages destructifs du matériau ont été observés. Le présent travail étudie simultanément le claquage de ces films de polypropylène et les décharges qui se produisent dans le liquide d'imprégnation en vue d'établir la relation entre les deux phénomènes.

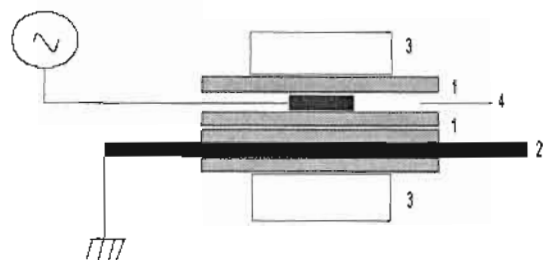
II - DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET CELLULE

L'ensemble du dispositif expérimental est le même que celui utilisé par Hammal⁽¹⁰⁾ et a donc largement été décrit par cet auteur. Nous rappellerons cependant l'essentiel.

1- La cellule d'étude

La cellule d'étude est un modèle de condensateur tout-film imprégné au M/DBT, figure 1.

FIGURE 1 : Schéma du système d'électrodes



- 1-Films de polypropylène
- 2-Electrodes
- 3-Plaques de verre
- 4-Diélectrique liquide

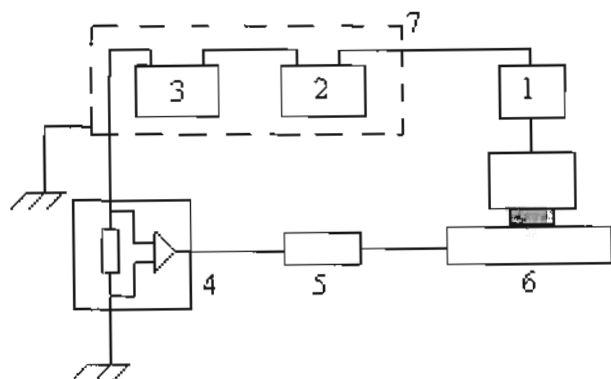
Elle est constituée de deux films de polypropylène de $13,6\mu\text{m}$ d'épaisseur chacun, pris en sandwich entre deux électrodes en feuille d'aluminium de $6\mu\text{m}$ d'épaisseur et de 9mm de largeur, à bords repliés. Ces électrodes sont disposées à 90° l'une par rapport à l'autre. L'ensemble est placé entre deux films de polypropylène du même type que les précédents. Ce système est maintenu pressé entre deux plaques

de verre de 5mm d'épaisseur permettant la visualisation des phénomènes qui se produisent sur les bords d'armatures. L'ensemble est monté dans un corps en téflon. Le condensateur tout-film ainsi constitué est rempli, sous vide $\sim 10^{-4}$ bar, d'un mélange aromatique (taux d'aromaticité 0,65) de monobenzyltoluène $C_{14}H_{14}$ (~65%) et de dibenzyltoluène $C_{21}H_{20}$ (~35%), lui aussi dégazé lors du pompage. La procédure de remplissage et d'imprégnation est calquée sur celle des condensateurs industriels. L'imprégnation dure environ 16 heures. La capacité mesurée du condensateur est de 60pF avant l'imprégnation et de 70pF après.

2- Le dispositif expérimental

Un générateur numérique de tension alternative sinusoïdale, dont la fréquence peut varier de 25 à 100Hz, alimente le primaire d'un transformateur élévateur de tension (100VA, 20kV). La valeur efficace de la tension au secondaire de celui-ci est volontairement limitée à 12,5kVeff afin d'y éviter les décharges partielles. Un diviseur capacitif sur le secondaire du transformateur permet de contrôler la valeur de la tension appliquée. Le transformateur est placé dans un des deux compartiments d'une cage de Faraday.

FIGURE 2. Schéma synoptique du dispositif expérimental



- 1-Générateur sinusoïdal
- 2-Transformateur
- 3-Cellule
- 4-Détecteur de décharges
- 5-Système d'acquisition et de traitement
- 6-Ordinateur de pilotage
- 7-Cage de Faraday.

La cellule d'étude est disposée dans l'autre compartiment et reliée au secondaire du transformateur. Sa sortie est reliée à la tête de mesure du système de détection des décharges partielles à l'aide d'un câble coaxial afin d'éviter les décharges parasites. Le système de détection et de mesure des décharges partielles est essentiellement constitué d'un circuit R, L, C parallèle dont la constante de temps est de 40ns. Quatre diodes 1N4148 montées deux à deux en parallèle, tête-bêche sont disposées en parallèle aux bornes de l'impédance de mesure et protègent le dispositif d'acquisition d'un éventuel claquage ou de décharges trop intenses, figure 2. La sensibilité du dispositif de mesure dépend de la capacité de la cellule d'étude et la dynamique de

la chaîne de mesure est de 32dB. Ainsi, au maximum de sensibilité, les décharges mesurées ont une amplitude contenue dans l'intervalle (0,05pC-2pC) tandis qu'à la sensibilité minimale, leur amplitude varie dans l'intervalle (50pC-2000pC). La résolution temporelle de ce dispositif est de 330ns entre deux décharges consécutives. Le dispositif mesure la charge apparente de chaque décharge, sa polarité ainsi que l'instant de son apparition et donc sa phase et la tension instantanée à laquelle elle apparaît. L'ensemble du dispositif expérimental est piloté par un micro-ordinateur du type PC486. Le mesureur de décharges ainsi que le logiciel de pilotage, d'acquisition et de traitement des données ont été entièrement conçus et réalisés (respectivement développés) au L.E.M.D.

III- RESULTATS EXPERIMENTAUX

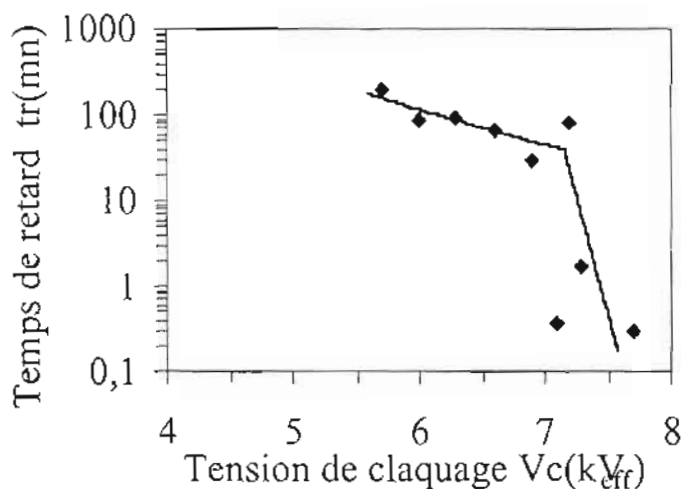
L'étude des décharges électriques et du claquage est faite en tension alternative (50Hz) d'amplitude constante. Pour toute valeur de tension appliquée, le dispositif de mesure des décharges recueille les informations relatives aux décharges successives (charge apparente, instant d'apparition compté depuis le début de l'application de la tension...) jusqu'au claquage destructif du matériau diélectrique. Nous considérons comme temps de retard au claquage, le temps qui s'écoule entre le début de l'application de la tension et l'instant du claquage des films de polypropylène.

1 - Temps de retard au claquage des films de polypropylène

Différentes valeurs de la tension d'essai ont été appliquées. Pour chacune d'elles, dix mesures du temps de retard au claquage ont été faites. La moyenne de ces valeurs a été utilisée pour caractériser le

matériau. Sur la figure 3 nous avons reporté les points représentatifs des couples de valeurs, temps de retard au claquage-tension d'essai.

FIGURE 3 : Variation du temps de retard au claquage avec la tension appliquée



La courbe des durées de vie ainsi obtenue est décroissante. Le temps de retard au claquage diminue donc lorsque la tension appliquée augmente comme il a été observé dans d'autres travaux^[6]. Cependant l'allure observée n'est pas hyperbolique, elle est plutôt constituée de deux parties distinctes. Aux tensions appliquées inférieures à 7 kV_{eff} environ, l'évolution est lente et le temps de retard au claquage est pratiquement proportionnel à la tension dans le système de coordonnées choisi. Les mesures réalisées aux tensions de plus en plus faibles ont montré qu'à 5,5 kV_{eff} aucun claquage n'a été détecté au bout d'un temps de 10h, relativement long vis-à-vis des temps généralement mesurés. La tension de 5,5 kV_{eff} peut être considérée

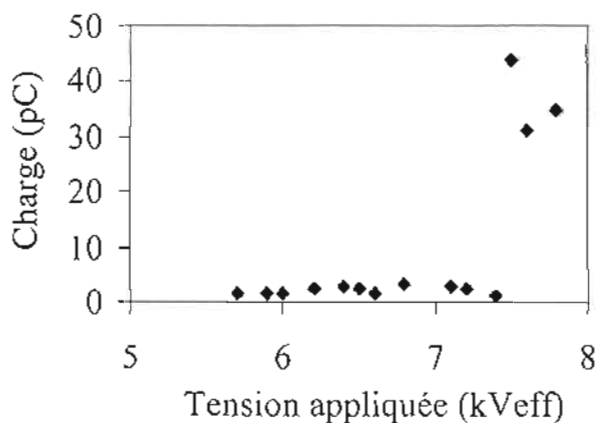
comme tension en dessous de laquelle les phénomènes physiques responsables du claquage que nous mesurons ne peuvent se produire dans notre système d'isolation.

Aux tensions supérieures à 7kVeff par contre, le temps de retard au claquage décroît très rapidement. Globalement, l'évolution de la courbe des durées de vie révèle que dans nos expériences deux causalités de rupture diélectrique sont mesurées. La première causalité se produit aux tensions inférieures à 7kVeff et entraîne le claquage du matériau à des temps relativement longs, supérieurs à 80 mn. La deuxième survient au-delà. Le claquage du matériau s'y produit à des temps très courts, d'environ 18s à 7,8 kVeff par exemple.

2 - Charge moyenne et fréquence moyenne des décharges

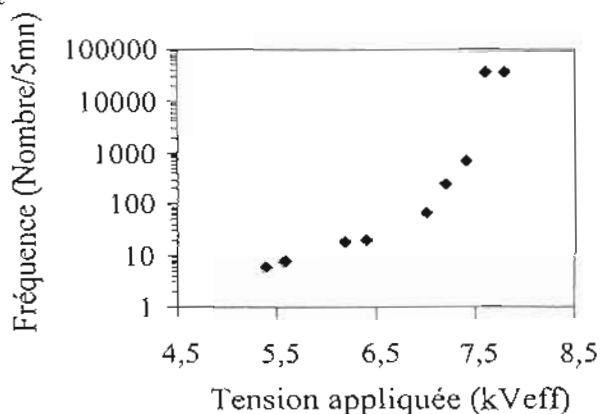
Sur les figures 4 et 5 nous avons reporté les courbes représentatives de la charge apparente moyenne et de la fréquence moyenne (exprimée en nombre de décharges détectées sur une durée d'acquisition de 5mn) en fonction de la tension appliquée.

FIGURE 4 : *Variation de la charge moyenne des décharges avec la tension appliquée*



Lorsque la tension appliquée augmente la charge moyenne des décharges est d'abord pratiquement constante et de l'ordre de 1-3pC, figure 4. Au-delà de 7 kVeff à 7,4 kVeff on observe une remontée brutale. Ainsi, à 7,5 kVeff la charge moyenne des décharges est de plus de 40pC. La fréquence moyenne des décharges varie de manière similaire, figure 5.

FIGURE 5 : Variation de la fréquence moyenne des décharges avec la tension appliquée



En effet, en dessous de 7kVeff son évolution est relativement lente. Au-delà, une croissance très rapide est observée. Ces changements de pente constatés dans l'évolution de la charge et de la fréquence moyennes des décharges lorsque la tension appliquée croît indique que deux régimes de décharges sont détectés dans nos cellules. Le premier régime survient aux tensions faibles inférieures à 7kVeff. Le deuxième régime se produit au-delà de cette valeur. La tension de 7kVeff constitue la tension de transition entre ces deux régimes. La charge et la fréquence moyennes des décharges y sont respectivement de 3pC et 100/5mn.

3 - Etat de surface du diélectrique solide après le claquage

La figure 6 présente une photographie de la surface du film de Polypropylène au voisinage du cratère formé lors du claquage.

FIGURE 6 : Photographie de la surface du film au voisinage des cratères



La zone claire (à gauche) de cette image représente une partie du film de polypropylène située entre les deux armatures d'aluminium. On y distingue les alvéoles d'un film de polypropylène intact. La zone sombre (à droite) représente la partie extérieure aux électrodes. La ligne droite de séparation de ces deux zones matérialise le bord d'armature. La zone très foncée qui s'étend du bord d'armature vers l'extérieur de la surface active est la zone endommagée par les décharges électriques. Les cratères se sont formés dans cette zone.

4 - Relation entre les décharges électriques et le claquage du polypropylène

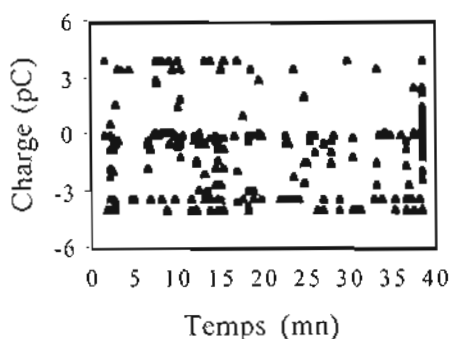
Les trois études précédentes montrent qu'il existe une corrélation entre les décharges électriques et le claquage du matériau. En effet lorsque la charge des décharges s'intensifie leur fréquence augmente et le temps de retard au claquage diminue. Par ailleurs dans le domaine des tensions inférieures à 7kVeff où la croissance de la charge et de la fréquence des décharges est lente la diminution du temps de retard au claquage est lente. Par contre au-dessus de 7kVeff où la croissance de la charge et de la fréquence est très rapide la diminution du temps de retard au claquage est également brutale. De plus la tension de transition entre les deux régimes de décharges est pratiquement égale à la tension à laquelle la courbe des durées de vie change d'allure. En fin l'on remarque que les cratères formés lors du claquage destructif des films de PP se situent dans la zone endommagée par les décharges. Le claquage étudié est vraisemblablement occasionné par des décharges électriques en bordure d'armatures.

5 - Analyse des décharges

5.1) Les décharges du premier régime

Sur la figure 7a nous présentons, jusqu'au claquage destructif du matériau isolant, un enregistrement $q(t)$ de la charge q des décharges individuelles en fonction de l'instant t à laquelle elles sont apparues, pour une tension appliquée de 6kVeff.

FIGURE 7a : Distribution temporelle des décharges pour une tension appliquée de 6 kVeff



Les décharges sont singulières et isolées. Leur charge individuelle, très dispersée, varie dans l'intervalle (0,1pC-4pC) si bien que l'allure réelle de la distribution temporelle est difficile à définir. Pour caractériser ces décharges dans le temps nous avons décomposé la durée de l'enregistrement de la figure 7a en canaux de 5mn et avons calculé dans chacun d'entre eux la charge apparente moyenne et la fréquence moyenne des décharges.

FIGURE 7b : Variation de la charge moyenne des décharges avec le temps à 6kVeff

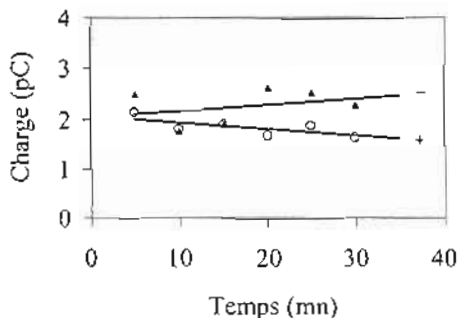
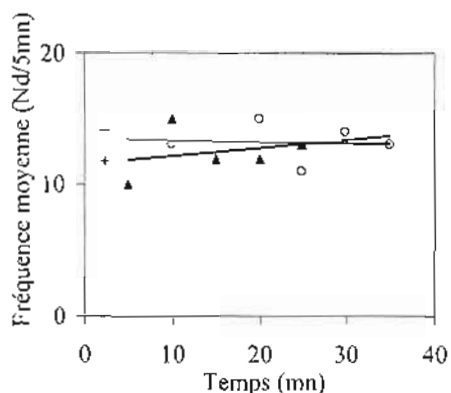


FIGURE 7C : Variation de la fréquence moyenne des décharges avec le temps à $6kV_{eff}$



Nous avons, par la suite, reporté sur les figures 7b et 7c les valeurs obtenues, en fonction du temps au centre des canaux. Les courbes obtenues sont pratiquement constantes. La charge et la fréquence des décharges sont donc indépendantes du temps d'application de la tension quelle que soit sa polarité.

FIGURE 8a : Distribution statistique des décharges positives pour une tension de $6kV_{eff}$

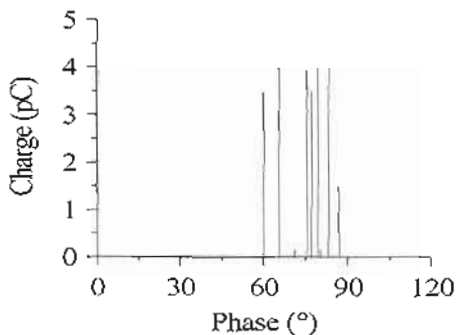
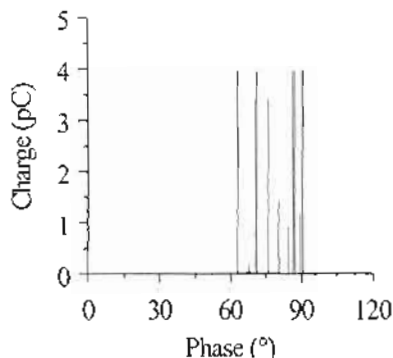
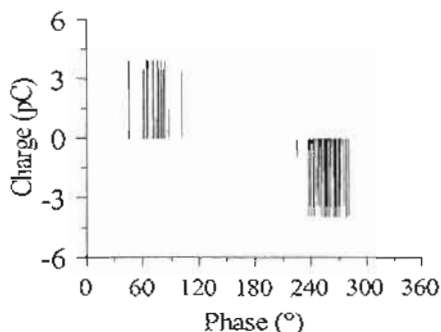


FIGURE 8b : *Distribution statistique des décharges négatives pour une tension de 6kVeff*



Leurs valeurs caractéristiques à 6 kVeff, déduites de ces courbes, sont d'environ 2pC et 13/5 mn respectivement. Sur les figures 8a et 8b nous avons représenté les distributions statistiques $q(\Phi)$ de la charge q des décharges de la figure 7a, survenues respectivement en polarité positive entre les instants 5mn et 10mn et en polarité négative entre les instants 30mn et 35mn, en fonction de la phase Φ de l'onde de tension à laquelle elles sont survenues. Sur la figure 8c enfin, nous avons reporté la distribution $q(\Phi)$ de toutes les décharges de l'enregistrement jusqu'au claquage du matériau.

FIGURE 8C : Distribution statistique globale des décharges pour une tension de 6kVeff



Ces trois distributions montrent que, quelles que soient la polarité et la durée d'application de la tension à notre cellule, aux erreurs d'expérimentation près, les décharges surviennent dans la bande de phase (60°-90°). Elles sont initiées dès que la phase de la tension atteint 60° et s'estompent au-delà de 90°. Un résultat similaire a été obtenu par d'autres auteurs^[11]. A partir de l'évolution de ces caractéristiques physiques (charge et fréquence) et de ces caractéristiques morphologiques (distributions statistiques) nous concluons que les décharges du premier régime n'évoluent pas dans le temps et que le liquide d'imprégnation ne vieillit pas de manière significative jusqu'au claquage destructif du matériau. Aussi, le changement de régime observé sur les figures 4 et 5 est le seul fait de la tension appliquée. La charge et la fréquence des décharges étant égales dans les deux polarités, nous concluons que nos cellules sont symétriques comme on pouvait s'y attendre au regard des dispositions de la figure 1. Par ailleurs à la phase d'initiation de ces décharges ($\Phi=60^\circ$) correspond une tension d'environ 5,2 kVeff. Notre dispositif de détection de décharges étant à la sensibilité maximum, la tension à laquelle les premières décharges sont détectées peut être considérée à première approximation comme tension d'amorçage des décharges.

Celle-ci est donc de 5,2kVeff. On s'aperçoit, aux erreurs d'expérimentation près, que la tension d'amorçage des décharges est égale à la tension en dessous de laquelle le claquage des films d'isolant ne peut survenir dans le système d'électrodes étudié, c'est-à-dire 5,5 kVeff. Ceci confirme que le claquage mesuré est provoqué par des décharges électriques dans le liquide d'imprégnation.

5.2) Les décharges du deuxième régime

La figure 9a présente, jusqu'au claquage destructif du matériau isolant, un enregistrement $q(t)$ de la charge q des décharges du deuxième régime en fonction de l'instant t à laquelle elles sont apparues, pour une tension appliquée de 7.8 kVeff. On constate que ces décharges surviennent en bandes, alternativement positives et négatives, de durée égale à environ 5ms. Leur amplitude, très dispersée, atteint parfois 200pC.

FIGURE 9a : *Distribution temporelle des décharges pour une tension appliquée de 7,8kVeff*

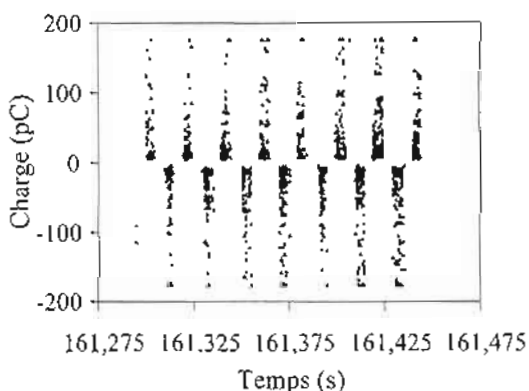
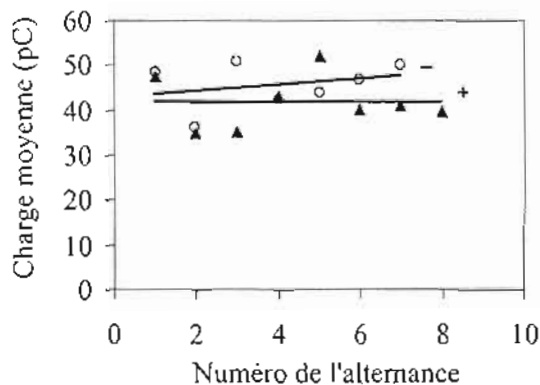
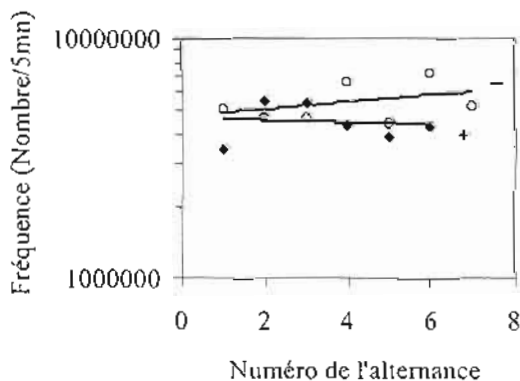


FIGURE 9b : Variation de la charge moyenne des décharges avec le temps à $7,8kV_{eff}$



Pour étudier l'évolution globale de ces décharges dans le temps, nous avons reporté sur les figures 9b et 9c respectivement leur charge moyenne et leur fréquence moyenne calculées sur une alternance, en fonction du numéro d'ordre de chaque alternance compté à partir du déclenchement de ces décharges.

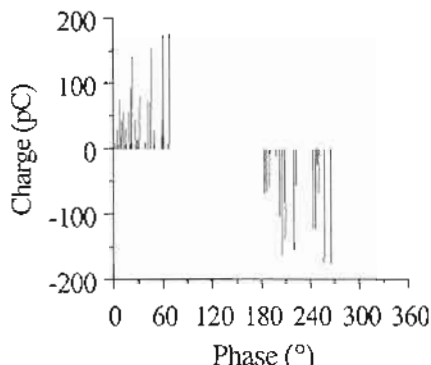
FIGURE 9c : Variation de la fréquence moyenne des décharges avec le temps à $7,8kV_{eff}$



Les points expérimentaux sont éparés mais à en juger par les droites d'ajustement obtenues par la méthode des moindres carrées, quelle que soit la polarité de la tension, la charge et la fréquence moyennes sont constantes et de l'ordre respectivement de 45pC et de $5.10^6/5mn$. Ceci montre que, de même que les décharges du premier régime, les décharges du deuxième régime n'évoluent pas de manière significative dans le temps. De ce fait nous avons choisi de manière arbitraire les décharges de la troisième période de l'enregistrement de la figure 9a et avons reporté sur la figure 10 la distribution statistique $q(\Phi)$ correspondante.

On constate que les décharges sont réparties sur toute la bande de phase comprise entre 0° et 90° .

FIGURE 10 : *Distribution statistique des décharges pour une tension appliquée de 7,8kVeff*

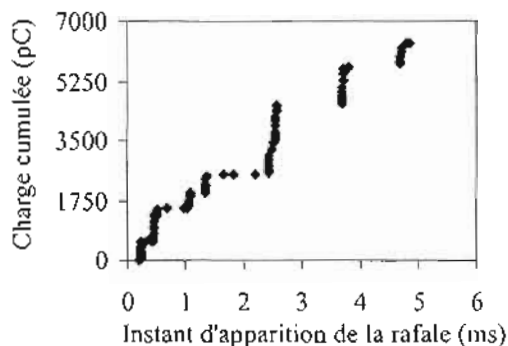


Les décharges du deuxième régime semblent donc se produire à tout moment de la montée de la tension instantanée jusqu'à son maximum. Pour vérifier et étayer cette hypothèse, nous avons considéré par exemple, l'alternance négative de cette onde. Nous

avons d'abord numéroté toutes les décharges de cette alternance, dans leur ordre de déclenchement, jusqu'au maximum de l'onde de tension.

Ensuite, nous avons associé à chaque décharge de rang i l'instant t_i de son apparition et la charge cumulée $\sum_{j=1}^i q_j$, égale à la somme de toutes les charges des décharges de rang inférieur ou égale à i . Nous avons enfin représenté la fonction $\sum_{j=1}^i q_j = f(t_i)$ sur la figure 11.

FIGURE 11 : Variation de la charge cumulée des décharges avec l'instant d'apparition des décharges



Une telle méthode a déjà été utilisée pour caractériser les décharges dans une structure de condensateur sphère-plan en rampe de tension continue et la courbe précédente a été appelée "courbe des décharges cumulées"^[8]. La courbe de la figure 11 représente une fonction en escalier. D'un point de vue physique, ceci signifie que pendant que la tension instantanée monte jusqu'à son maximum, les décharges du deuxième régime se produisent sous la forme d'une

succession de rafales. La figure 11 montre de plus que deux rafales consécutives sont séparées par quelques décharges erratiques de faible amplitude. Le phénomène est reproductible d'une alternance de tension à une autre, d'une polarité à une autre et d'une cellule à une autre si bien que nous pensons que ces rafales sont caractéristiques des décharges du deuxième régime. Par analogie aux caractéristiques mathématiques des fonctions en escalier, deux paramètres peuvent servir à caractériser ces rafales de décharges, la charge totale d'une rafale et le temps qui sépare deux rafales consécutives, figure 11. Pour déterminer ces deux grandeurs nous avons tracé plusieurs courbes de décharges cumulées, puis nous avons constitué des échantillons de données relatives à la charge totale d'une rafale Q_r (58 valeurs) et au temps qui sépare deux rafales consécutives τ_r (52 valeurs). Nous avons enfin calculé la valeur moyenne de chacune de ces deux grandeurs. Nous trouvons respectivement pour la charge de la rafale $Q_r = 380 \text{ pC}$ et pour le temps entre deux rafales consécutives $\tau_r = 450 \text{ }\mu\text{s}$.

IV – DISCUSSIONS

Il a déjà été montré dans d'autres travaux que, selon la valeur de l'amplitude de la tension alternative appliquée à une structure de condensateur, différents types de décharges sont observés. Ainsi les premières décharges détectées dans un système d'électrodes pointe/plan, où le diélectrique est un hydrocarbure liquide saturé et la pointe est négative, sont dues à des avalanches électroniques dans le liquide¹²¹. Dans les hydrocarbures liquides (cyclohexane...), lorsque le rayon de courbure de la pointe est de $3\text{ }\mu\text{m}$, ces décharges sont initiées à un champ électrique de $6\text{-}7\text{MV/cm}$, leur charge est de l'ordre de 1pC et leur fréquence d'apparition proportionnelle à la tension. Chacune de ces décharges donne naissance à une micro bulle qui disparaît très

rapidement dans le liquide. Des observations similaires ont été faites dans les liquides aromatiques (toluène) mais le champ seuil d'apparition des décharges mesuré y est inférieur et de l'ordre de $4\text{-}5\text{MV/cm}^{[13]}$. Aux tensions élevées, supérieures à la tension d'amorçage de ces décharges, une décharge peut survenir dans la micro bulle. Celle-ci donne naissance à une autre bulle en avant de la première, puis à une autre décharge et ainsi de suite. Ce phénomène répétitif conduit à la formation d'une chaîne de bulles accolées qui se propage vers l'électrode plane sous la forme d'une branche d'arbre appelée "streamer"^[14]. Chaque fois qu'une tension d'amplitude suffisante est appliquée au système d'électrodes, un streamer est initié, se propage pendant un temps et atteint une longueur caractéristique, puis se désintègre en petites bulles rapidement absorbées dans le liquide. Le temps de propagation du streamer et la longueur qu'il atteint dépendent de la tension appliquée. Durant sa phase de propagation le streamer produit des courants transitoires dont l'évolution temporelle est liée à son aspect touffu ou ramifié. Le courant transitoire d'un streamer ramifié par exemple est constitué d'une composante continue à laquelle se superposent des impulsions courtes. L'amplitude de ces impulsions et le temps entre deux impulsions consécutives croissent au fil du temps. Toutes ces propriétés ont été vérifiées aussi bien dans le cas de décharges en volume que dans celui de décharges rampant à l'interface entre un solide isolant et un diélectrique liquide^{[15], [16]}.

A présent nous considérons par exemple la première rafale de la figure 11. La charge apparente des décharges individuelles qui la constituent est représentée en fonction du temps sur la figure 12a. On s'aperçoit que la durée entre deux décharges consécutives d'une part et la charge des impulsions de décharges d'autre part augmentent dans le temps. Ceci est en accord avec des travaux antérieurs sur les streamers^{[12], [17]}. A titre de comparaison nous présentons sur la figure

12b l'évolution temporelle de l'amplitude des impulsions de décharges dans un streamer, obtenue dans l'huile de transformateur, dans un système pointe/plan où la pointe est de polarité négative^[18].

FIGURE 12a : Evolution de la charge des impulsions de décharges d'une rafale avec le temps

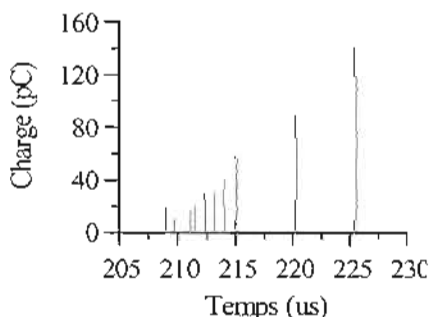
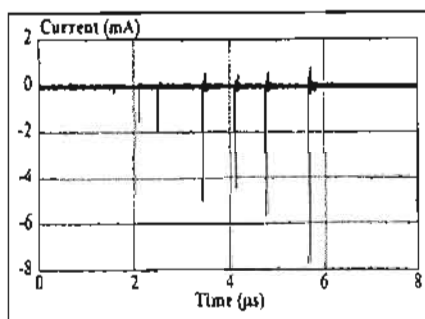


FIGURE 12 b : Evolution des impulsions de courant dues aux streamers dans le temps^[18].



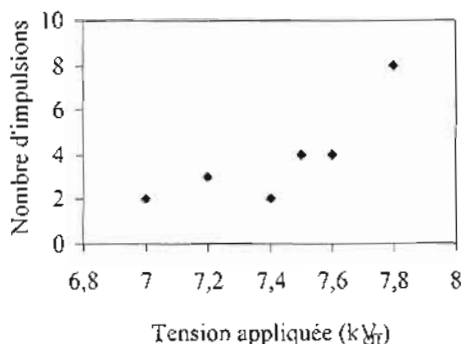
Les deux évolutions sont similaires. Au regard de toutes ces similitudes nous concluons que les rafales de décharges du deuxième régime sont des streamers. Les décharges du deuxième régime se produisent donc dans des canaux gazeux qui se développent dans le liquide d'imprégnation entre les films de polypropylène. En conséquence le début et la fin de la rafale s'identifient respectivement à l'initiation et à la désagrégation du streamer. L'inverse du temps qui s'écoule entre deux rafales consécutives permet d'estimer la fréquence de reproduction du streamer et est de l'ordre de 2200 s^{-1} . Sa charge totale est d'environ 380 pC .

Afin de rechercher la nature des décharges du premier régime, nous avons considéré différentes amplitudes de tension supérieures à 7 kVeff . Pour chacune d'elles, nous avons tracé l'évolution temporelle de la charge des impulsions de décharges contenues dans les rafales, figure 12a, et nous y avons déterminé le nombre d'impulsions N_p . Nous avons enfin représenté N_p en fonction de l'amplitude de la tension sur la figure 13. La courbe obtenue représente une fonction croissante. Le nombre d'impulsions de décharges dans une rafale (streamer) décroît donc lorsque la tension appliquée devient de plus en plus faible. Il est d'environ 2 entre 7 kVeff et $7,3 \text{ kVeff}$.

Selon les prévisions théoriques, cette évolution montre que de moins en moins de bulles sont formées et que le streamer se propage moins. A la transition où seules deux impulsions constituent le streamer, très peu de bulles sont formées. On peut donc prévoir qu'en dessous de 7 kVeff , même si une bulle venait à être formée, elle serait rapidement absorbée dans le liquide sans que des décharges n'aient eu le temps de s'y manifester. Les décharges du premier régime se produisent nécessairement en phase liquide. Par ailleurs, en faisant croître la tension, ces décharges précèdent juste les streamers (rafales de décharges). Elles sont singulières, isolées et de faible fréquence.

L'évolution de leur fréquence moyenne est bien corrélée avec la tension appliquée, figure 5. Leur charge moyenne est de l'ordre de 1pC à 3pC. Ces caractéristiques sont similaires à celles mesurées par Kattan et al.[12] puis Brouche et al.[13]. De plus ces décharges sont obtenues dans un système d'électrodes de rayon de courbure $r_p \sim 6\mu\text{m}$ et dans un milieu diélectrique liquide (M/DBT) voisins de ceux utilisés par les précédents auteurs. De même que ces derniers nous pensons donc que les décharges du premier type sont dues à des avalanches électroniques en phase liquide.

FIGURE 13 : Variation du nombre d'impulsions dans une rafale avec la tension appliquée



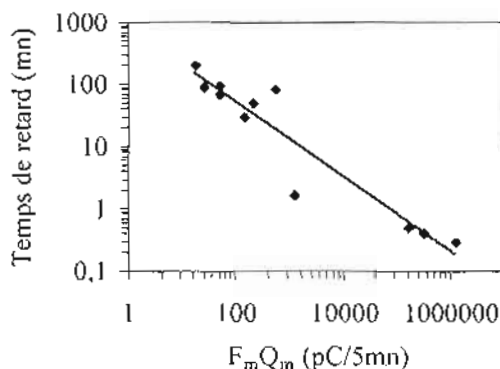
Finalement, si nous rapprochons les deux régimes de décharges précédents de la courbe des durées de vie du polypropylène imprégné, nous concluons que le claquage est occasionné au-delà de 7 kV_{eff} par des décharges dans une phase gazeuse (streamers) tandis qu'en dessous de cette valeur il est causé par des avalanches électroniques dans le liquide. La durée de vie de l'isolant est donc plus courte

lorsqu'il est soumis à des streamers que lorsqu'il est soumis à des avalanches électroniques dans le liquide.

Le schéma général de la défaillance d'une isolation sous l'action des décharges montre que le claquage peut être consécutif à une érosion progressive de la surface du matériau, à une dégradation chimique ou encore à des craquelures^[19]. En général pour caractériser la nocivité des décharges sur une isolation, on utilise la charge apparente^[20] ou la fréquence des décharges^[21]. Par ailleurs, il a été observé dans la géométrie sphère-plan, dans le benzyltoluène, que la charge totale déposée à la surface d'un matériau jusqu'au claquage pouvait servir à caractériser l'état de la dégradation de celui-ci^[22].

Afin de rechercher, à partir de nos expériences, la relation entre les grandeurs caractéristiques du claquage et ceux des décharges d'une part, et d'étudier le mécanisme de base du claquage sous l'action de ces différents types de décharges d'autre part, nous avons reporté pour notre part, sur la figure 14, le temps de retard au claquage τ_n en fonction du produit de la fréquence moyenne par la charge moyenne des décharges, c'est-à-dire $F_m Q_m$.

FIGURE 14 : Relation entre la caractéristique du claquage et celle des décharges



On s'aperçoit que la répartition des points expérimentaux dans le système de coordonnées choisi est bien ajustée par une droite unique (coefficient de corrélation $r=0,95$). Le temps de retard au claquage des films de PP soumis à des décharges électriques d'une part et les caractéristiques (charges et fréquence) de ces décharges d'autre part sont donc reliés, indépendamment de la nature des décharges, par une fonction hyperbolique de la forme $\tau_n=800/(F_m Q_m)^{0,6}$. La droite unique indique que quel que soit le régime de décharges (avalanches en phase liquide et décharges dans des canaux gazeux) c'est l'effet cumulé de la fréquence des impulsions sur le matériau isolant et de la charge qu'elles transportent qui détermine la durée de vie du matériau. Ceci rappelle l'idée d'une dégradation progressive de la surface du matériau, entraînant la formation de radicaux libres, jusqu'au claquage. Un résultat analogue a été obtenu par micro-spectrométrie IRTF sur des films de polypropylène testés dans le benzyltoluène (BT) et des pics d'absorption caractéristiques de liaisons C=C ou C-O-C ont été obtenus^{[22] [23]}.

V – CONCLUSION

Il s'est agi dans ce texte d'étudier le mécanisme du claquage diélectrique de film de polypropylène, dans une structure de condensateur tout-film imprégné au M/DBT, en tension alternative. Habituellement, la seule influence de la pression hydrostatique du milieu environnant sur la tension de claquage du matériau diélectrique permet d'attribuer le claquage à des décharges électriques dans le milieu ambiant. La démarche utilisée dans ce travail est différente.

D'abord nous avons identifié la nature du claquage, en comparant la tension-seuil du claquage à la tension d'apparition des décharges d'une part, en comparant les variations du temps de retard au claquage

en fonction de l'amplitude de la tension appliquée à celles de la charge et de la fréquence des décharges d'autre part et, en fin, en localisant le cratère formé lors du claquage du matériau par rapport aux bords des armatures. Nous avons ainsi observé que le claquage du polypropylène dans la structure étudiée est consécutif à deux régimes différents de décharges électriques dans le milieu qui l'entoure.

Par la suite nous avons caractérisé ces décharges à l'aide de trois paramètres (la tension d'apparition, la charge et la fréquence des décharges).

- Les décharges du premier régime se produisent entre 5 kVeff et 7 kVeff. Elles sont singulières et isolées et leur charge individuelle est très dispersée.

- Les décharges du deuxième régime surviennent à partir de 7 kVeff. Elles se produisent par paquets et ont un caractère séquentiel. L'étude statistique, sous une tension de 7,8 kVeff par exemple, confirme ces faits et nous en avons déduit, pour la charge totale d'un paquet de décharges 400 pC et pour la fréquence de reproduction des paquets 2000 s⁻¹.

Ces deux séries d'études nous ont alors permis d'établir une corrélation entre le claquage du matériau et les décharges dans le liquide d'imprégnation. Ainsi, dans la structure de condensateur étudiée, les décharges se déclenchent à 5 kVeff et le claquage du matériau ne peut survenir qu'au-delà de cette valeur. Lorsque l'amplitude de la tension est inférieure à 7 kVeff, les décharges sont dues à des avalanches électroniques dans le liquide d'imprégnation. Au-delà de cette valeur elles se produisent dans des canaux gazeux. Dans les deux cas, le claquage est consécutif à un processus de dégradation progressive de la surface du matériau mais la charge et la fréquence des décharges déterminent la durée de vie du matériau.

Les résultats que nous venons d'exposer sont très importants et doivent trouver leur intérêt dans le domaine du calcul des isolations électriques. En effet de nombreux travaux ont été effectués sur le claquage des matériaux diélectriques solides mais, en notre connaissance, aucun n'a permis de relier le claquage à un mécanisme précis de décharges. Toutefois il convient de remarquer que l'étude des décharges a été faite essentiellement par des méthodes statistiques en utilisant les valeurs moyennes et peut comporter quelques imprécisions. De plus l'identification des décharges du premier régime a été faite par comparaison des seules valeurs moyennes de la charge et de la fréquence aux valeurs mesurées par Denat et al). Une identification plus rigoureuse nécessite en plus de nos résultats la comparaison du profil temporel des impulsions à ceux mesurés par Devins.

VI - LISTE DES GRANDEURS ET SYMBOLES UTILISES

Grandeur	Symbole	Unité (S.I)	Unité utilisée	Observation
Puissance		Watt (W)	Volt-Ampère (VA)	1VA=1W
Tension		Volt (V)	Kilovolt (kV)	1kV=1000V
Tension efficace	Q ou q	Volt (V)	Kilovolt efficace (kVeff)	1kVeff \approx 707V
Charge		Coulomb (C)		1pC=10 ⁻¹² C
Capacité	r _p	Farad (F)	Picoconlomb (pC)	1pF=10 ⁻¹² F
Rayon de courbure		Mètre (m)	Picofarad (pF)	1mm=10 ⁻⁶ m
Champ électrique		Volt par mètre (V/m)	Micromètre (mm)	
			Mégavolt par centimètre (MV/cm)	1MV/cm=10 ⁸ V/m

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] - FENDLEY J.J., PARKMAN N., "Effect of Impregnation, Compression and Temperature on Electric Strength of Polythene and Polypropylene", *IEE Proc.*, (1982), Vol. 129, Pt. A, N°2, pp. 113-118.
- [2] - SEBILLOTTE E., THEOLEYRE S., SAÏD S., GOSSE J.P., GOSSE B., "AC Degradation of Impregnated Polypropylene Films", *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, (1992), Vol. 27, N°3, pp. 557-565.
- [3] - SIEROTA A., CALDERWOOD J.H. "Breakdown By Discharges On Solid Dielectric Surfaces In Air And In Insulating Liquids", 9th Int. Conf. On Cond. and Break. In Diel. Liq., Salford UK, 1987, pp. 428-433.
- [4] - KLEIN N., SOLOMON P. "Current Runaway in Insulators Affected by Impact Ionization and Recombination", *J. Appl. Phys.*, (1976), Vol. 47, N°10, pp. 4364-4372.
- [5] - REED C.W., CICHANOWSKI S.W., "The Fundamentals of Aging in HV Polymer-Film Capacitors", *IEEE Trans. on Diel. And Elect. Insul.*, (1994), Vol. 1, N°5, pp. 904-922.
- [6] - ARIEF M. "Détermination du Champ de Rupture Spécifique Sous Tension Continue de Couches Minces de Polystyrène", *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse*, 1985.
- [7] - BERGER N., JAY P. "A New Impregnant for High Voltage Power Capacitors", *IEEE Trans. on Elect. Ins.*, (1986) Vol. 21, N°1, pp. 59-63.

- [8] - ADOHI B. J.P., GOSSE J.P., GOSSE B., "Le Champ Critique de Claquage de Films d'oxyde de Polyphénylène Réalisés Par Voie Electrochimique", *J. Phys. III*, (1991) N°1, pp. 1623-1646.
- [9] - DUMITRESCU L., LESAJNT O., BONIFACI N., DENAT A., NOTINGHER P., "Study of Streamer Inception In Cyclohexane with a Sensitive Charge Measurement Technique Under Impulse Voltage", *J. Electrostat.*, (2001), Vol. 53, 135-146.
- [10] - HAMMAL R., RAIN P., GOSSE J.P., HANTOUCHE C., "Study and Characterization of Partial Discharges in Impregnated Polypropylene Capacitors", *IEEE Trans. on Dielect. And Elect. Insul.*, (2000) Vol. 7, N°3, pp. 446-457.
- [11] - MORSHUIS P.H.F., "Partial Discharge Mechanisms", Thèse, Delft University Press, 1993.
- [12] - KATTAN R., DENAT A., BONIFACI N., "Formation of Vapor Bubbles in non-polar Liquids Initiated by Current Pulses" *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, (1991), EI 26, N°4, pp. 656-662.
- [13] - BROUCHE M., GOSSE J.P., GOSSE B., "Conduction de liquides aromatiques en géométrie pointe-plan", *J. Phys. III France*, (1993), N°3, pp. 1111-1121.
- [14] - LESAJNT O., TOBAZÉON R., "Streamer Generation and Propagation in Transformer Oil Under AC Divergent Field Conditions", *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, (1988), EI 23, N°6, pp. 941-954.
- [15] - ATJEN P., SAKER A., "Streamer Propagation Over a Liquid/Solid Interface", *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, Vol. 28, (1993), N°2, pp. 230-242.

- [16] - RAIN P., BOISDON C., LESAINT O., TOBAZÉON R., "Behaviour of Streamers Under Divergent AC Fields in Transformer Oils at Large Gaps", *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, *EI 26*, (1991), N°4, pp. 715-725.
- [17] - FOX M., PLESSNER K.W., HALL M.M.J., "Theory of Discharges at the Foil Edge in Capacitors", *Proc.IEE*, (1968), *Vol. 115*, N°7, pp.1027-1033.
- [18] - DEBRUYNE H., LESAINT O., "On the Significance of PD Measurements in Liquids", *11th Int. Symp. on High Volt. Ing.*, (1999), *Vol. 5*, London, pp. 45-48.
- [19] - MASON J.H., "Discharges", *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, *EI 13*, (1978), N°4, pp. 211-238.
- [20] - MENGUY C., "Mesure de l'énergie des décharges partielles et dégradation des isolants", *Revue Générale d'Electricité*, (1990), N° 8, p. 45.
- [21] - PLEIFFER W., "High-frequency voltage stress of insulation", *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, (1991), *Vol. 26*, N° 2, pp. 239.
- [22] - NEMAMCHA M., GOSSE J.P., GOSSE B., "Effect of Partial Discharges on Impregnated Polypropylene Films", *IEEE Trans. on Diel. and Elect. Insul.*, (1994), *Vol. 1*, N° 4, pp. 578-584.
- [23] - GOSSE B., GOSSE J.P., SAÏD S., GADOUH H., NEMAMCHA M., "Electrical Degradation of Polypropylene : A Study by I.R.T.F Microspectrometry", *J. Appl. Polym. Sc.*, (1992), N° 46, pp. 1121-11