

D000 2/93

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

THESE

Présentée par

Mohamed NEMAMCHA

Pour obtenir le grade
de

DOCTEUR D'ETAT ES-SCIENCES

**DECHARGES ELECTRIQUES DANS DIFFERENTES STRUCTURES
D'ISOLATION IMPREGNEE**

Soutenue le 19 décembre 1993.

devant le jury composé de:

Professeur	M. BENDAOU	Président
Professeur	A. BEROUAL	Rapporteur
Professeur	J.P. GOSSE	Rapporteur
Professeur	S. LEULMI	Examinateur
Professeur	T. SADOUN	Examinateur

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

THESE

Présentée par

Mohamed NEMAMCHA

Pour obtenir le grade
de

DOCTEUR D'ETAT ES-SCIENCES

**DECHARGES ELECTRIQUES DANS DIFFERENTES STRUCTURES
D'ISOLATION IMPREGNEE**

Soutenue le 19 décembre 1993.

devant le jury composé de:

Professeur	M. BENDAOU	Président
Professeur	A. BEROUAL	Rapporteur
Professeur	J.P. GOSSE	Rapporteur
Professeur	S. LEULMI	Examineur
Professeur	T. SADOUN	Examineur

Ce travail a été effectué au Laboratoire d'Electrostatique et des Matériaux Diélectriques (LEMD) CNRS Grenoble sous la direction de Monsieur J.P. Gosse Directeur du LEMD et Professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble auquel j'adresse mes remerciements pour l'accueil qu'il m'a réservé et l'amitié qu'il a manifesté à mon égard tout au long de ce travail. Je saisis cette occasion pour lui exprimer toute ma reconnaissance et mon amitié.

Mes remerciements et mes sentiments d'amitié s'adressent aussi à Monsieur A. Beroual Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger pour la co-direction scientifique et l'intérêt qu'il n'a cessé de manifester à l'égard de mon travail.

Que Monsieur M. Bendaoud Professeur à l'Université des Sciences et Techniques Houari Boumediène d'Alger trouve ici l'expression de ma reconnaissance et le grand honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de thèse.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus vifs à Monsieur S. Leulmi Professeur à L'Ecole Normale Supérieure de Skikda pour avoir participé au jury de soutenance de cette thèse.

Je remercie très chaleureusement Monsieur T. Sadoun Professeur à l'Université des Sciences et Techniques Houari Boumediène d'Alger pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en faisant partie du jury.

A Madame B. Gosse Directeur de Recherche au LEMD (CNRS), j'adresse toute ma gratitude pour sa fructueuse collaboration et son entière disponibilité dans la concrétisation du présent travail.

C'est avec un grand plaisir que je tiens à remercier tout le personnel du Laboratoire d'Electrostatique et des Matériaux Diélectriques avec qui j'ai entretenu de bonnes relations d'amitié au cours de mon séjour dans ce laboratoire.

Table des matières

INTRODUCTION	7
PREMIERE PARTIE: GENERALITES	
<u>CHAPITRE 1:</u> Etude bibliographique sur les décharges	12
Introduction	13
I.1. Les condensateurs de puissance	13
I.1.1. Evolution de la technologie des condensateurs de puissance.	13
a. Le diélectrique solide	14
b. Le diélectrique liquide	15
I.2. Différentes techniques de détection des décharges	18
I.2.1. Méthodes non-électriques	18
I.2.2. Méthodes électriques	19
I.3. Méthodes d'analyse des décharges	23
I.4. Décharges dans les condensateurs de puissance	24
Conclusion	26
Bibliographie du chapitre 1.	27
<u>CHAPITRE 2:</u> Techniques expérimentales	31
Introduction	32
I. Dispositif de détection des décharges	32
I.1. Source de haute tension	32
I.2. Cellule d'étude	32
I.3. Tête amplificatrice	32

I.4. Circuit de détection et de mesure des décharges	36
II Montage d'intensification d'image	38
III. Programme d'exploitaion des décharges	38
III.1. Structure du logiciel	38
III.2. Différentes procédures	38
Discussion et conclusion	51
Bibliographie du chapitre 2.	52

DEUXIEME PARTIE: DECHARGES DANS DIFFERENTES STRUCTURES D'ISOLATION

<u>CHAPITRE 1:</u> Décharges dans des modèles de condensateur plan	54
Introduction	55
I. Expérimentation	56
I.1. Modèle de condensateur	56
I.2. Détection des décharges	57
II. Résultats expérimentaux	59
II.1. Tension d'apparition des décharges	59
II.1.a. Influence de l'épaisseur du diélectrique	61
II.1.b. Influence de la température	61
II.2. Comparaison liquide aliphatique/liquide aromatique	61
II.2.a. Sur la tension V_a	63
II.2.b. Sur la forme et la localisation des décharges	65
II.2.c. Influence de la pression	65
II.2.d. Influence de la résistivité du liquide	67
II.2.e. Action de l'époxyde sur les décharges	68
II.3. Décharges et vieillissement des condensateurs	69
II.3.a. Vieillissement V_{i1}	69
II.3.b. V_{i2}	71
II.3.c. V_{i3}	71
II.4. Propriétés du liquide et du PP après V_{i3}	71
II.4.a. Propriétés du liquide	71
II.4.b. Propriétés des films de PP	73
Discussion et conclusion	76
Bibliographie du chapitre 1	78

<u>CHAPITRE 2:</u> Décharges dans une interstice de liquide	81
Introduction	82
I. Résultats expérimentaux	84
I.1. Cavité au milieu du diélectrique	84
I.1.a. Cavité entre trois films de 13,6 μm	84
I.1.b. Cavité entre deux films de 5 μm	87
I.2. Cavité au contact de l'électrode	91
I.3. Analyse des films de PP	95
I.3.a. Abaissement de la tension de claquage au voisinage de la cavité	95
I.3.b. Analyse par IRTF	95
Conclusion	97
Bibliographie du chapitre 2	99
<u>CHAPITRE 3:</u> Décharges en bord d'armature de condensateur	101
Introduction	102
I. Modèle de condensateur	102
II. Résultats expérimentaux	104
II.1. Tension d'apparition des décharges	104
II.2. Caractéristiques des distributions $n(\phi)$ et $q(\phi)$	105
II.3. Influence du repli de l'extrémité du film d'Al	105
Conclusion	106
Bibliographie du chapitre 3.	106
<u>CHAPITRE 4:</u> Identification des sources de décharges	107
Introduction	108
I. Synthèse des décharges dans différentes configurations	108
II. Protocole d'identification	113
III. Exemple d'identification	114
Conclusion	115
Bibliographie du chapitre 4	116

TROISIEME PARTIE:	DEGRADATION SOUS DECHARGES DU POLYPROPYLENE IMPREGNE	
Introduction		118
Techniques expérimentales		119
Résultats expérimentaux		120
1. Description du régime de décharges		120
a. Décharges en fonction de la tension		120
b. Caractéristiques des décharges à 2 kV		120
c. Evolution des décharges dans le temps		124
2. Abaissement de la rigidité diélectrique du film de PP		124
3. Analyse des films de PP ar IRTF		125
Conclusion		127
Bibliographie de la troisième partie.		129
CONCLUSION GENERALE		131

INTRODUCTION

Les condensateurs de puissance utilisés dans le redressement du facteur de puissance et le stockage de l'énergie réactive constituent un exemple type d'une isolation mixte solide/liquide. Leur qualité dépend des propriétés intrinsèques du liquide et du solide d'une part et de l'interaction mutuelle des deux matériaux d'autre part. Une étape importante a été franchie dans la technique de fabrication des condensateurs de puissance, par la mise sur le marché de liquides non chlorés améliorant considérablement le gradient de service ($\sim 60 \text{ V}/\mu\text{m}$) et le niveau des pertes diélectriques ($\sim 10^{-4}$). Parmi les qualités requises pour un liquide imprégnant, nous distinguons sa capacité d'absorption ou de génération de gaz formé dans le liquide (gassing), propriété en rapport direct avec l'apparition des décharges dans le liquide [1]. Des études sur le claquage de modèles de condensateurs ont montré que les points à faible rigidité diélectrique sont localisés soit dans le volume de l'isolation et préférentiellement dans les zones de surabondance de liquide, soit en bord d'armature dans les zones de renforcement de champ électrique [2, 3, 4].

Un récent travail effectué au LEMD sur les condensateurs au polypropylène imprégné [5], a montré qu'au cours d'un essai de vieillissement accéléré sous contraintes thermiques et électriques, la durée de vie de certains condensateurs peut être abaissée à moins de 24h. La dégradation reste localisée en quelques points et peut être due à un mécanisme de nature électrochimique lié au passage du courant (réactions d'oxydo-réduction) aux champs électriques faibles et moyens. Une autre possibilité aux champs électriques très élevés (cas des surtensions de commutation et accidentelles dans un condensateur), est que la dégradation et donc le claquage des condensateurs soit dûe à des décharges dans le liquide dans des régions de champ électrique renforcé. C'est cette possibilité que nous avons explorée.

Ce travail porte sur l'étude des décharges dans différentes structures simulant différents types de défaut dans une isolation imprégnée. Il a un double objectif:

- 1) Caractériser les décharges dans ces structures et chercher une corrélation entre les caractéristiques des décharges et le type de défaut.
- 2) Etudier la dégradation des isolations imprégnées sous l'action des décharges.

Dans la première partie, nous présentons une étude bibliographique sur l'évolution des techniques de fabrication des condensateurs de puissance en rapport avec l'évolution des propriétés des matériaux constitutants et nous faisons un rappel des différentes techniques de détection et d'analyse des décharges dans les isolations à

haute tension [chapitre 1]. Nous exposons ensuite les techniques expérimentales mises en oeuvre dans la détection et l'analyse des décharges dans la présente étude [chapitre 2].

La deuxième partie est consacrée à l'étude des décharges dans différentes structures simulant différents types de défaut dans une isolation imprégnée.

Dans le chapitre 1, nous étudions les décharges dans des modèles de condensateur plan. Dans ces modèles, nous examinons l'influence de différents paramètres tels que la tension appliquée, la nature du liquide imprégnant (aliphatique ou aromatique), la pression hydrostatique et la température sur les caractéristiques des décharges et nous vérifions si au cours du vieillissement accéléré, la dégradation du matériau est due à des décharges.

Dans le chapitre 2, nous étudions les décharges dans des interstices de liquide simulant des poches pouvant exister au cours du bobinage et l'aplatissement des galettes de condensateur. Nous examinons l'influence de la taille et de la position de l'interstice de liquide sur le niveau de tension d'apparition des décharges et leurs caractéristiques.

Le chapitre 3 est consacré à l'étude des décharges dans des modèles simulant des bords d'armature de condensateurs industriels.

Dans le chapitre 4, nous présentons une synthèse des caractéristiques des décharges dans différentes configurations qui diffèrent soit par leur géométrie soit par l'environnement dans lequel les décharges ont lieu. Ces caractéristiques forment une banque de données pour le modèle d'identification des sources de décharges que nous décrivons.

La troisième partie comporte une étude sur la dégradation sous décharges de films de polypropylène imprégné au monobenzyltoluène. Nous étudions l'influence des décharges sur l'abaissement de la rigidité diélectrique des films et analysons les produits de dégradation. Nous considérons aussi l'influence de l'époxyde sur le processus de dégradation sous décharges.

Bibliographie:

- [1] P. BEZBOREDKO, O. LESAIN and R. TOBAZEON
Study of partial discharges and gassing phenomena within gaseous cavities in insulating liquids.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol.27, N°2, p. 287-297, April 1992.
- [2] R. MEYRUEIX
Etude de la génération et du comportement d'une phase gazeuse dans un liquide diélectrique soumis à un champ électrique.
Thèse de Docteur-Ingénieur; INPG Grenoble 1980.
- [3] S. CHNIBA
Etude des mécanismes de claquage de films de polypropylène dans différents milieux ambiants.
Thèse de Doctorat 3è cycle Grenoble 1984.
- [4] C. BROSSEAU
Etude expérimentale de la conduction électrique et des phénomènes de claquage dans les imprégnants pour condensateurs en association avec des films de polypropylène.
Thèse de Doctorat de l'U.J.F. Grenoble1 1989.
- [5] E. SEBILLOTTE, S. THEOLEYRE, S. SAID, B. GOSSE and J.P. GOSSE
AC degradation of impregnated polypropylene films.
I.E.E.E. Trans. on Elect. Insul., Vol. 27, N°3, p. 557, June 1992.

PREMIERE PARTIE

GENERALITES

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES DECHARGES

Introduction:

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'évolution de la technologie et des performances des condensateurs de puissance en rapport avec l'évolution des propriétés intrinsèques des matériaux constitutifs, nous analysons ensuite les différentes techniques de détection et d'analyse des décharges dans les appareils à haute tension et plus particulièrement dans les isolations imprégnées.

1.1 Les condensateurs de puissance:

Dans cette partie nous passons en revue l'évolution de la technologie des condensateurs dits "tout-film" à travers l'évolution des matériaux diélectriques, ce qui a conduit à l'amélioration des propriétés de ces condensateurs (gradient de service, niveau de pertes,...).

1.1.1. Evolution de la technologie des condensateurs de puissance:

Les condensateurs de puissance représentent un exemple type d'une isolation mixte solide/liquide. Leur qualité dépend donc des propriétés intrinsèques du liquide et du solide d'une part et de l'interaction mutuelle des deux matériaux d'autre part. Dans le tableau 1.1 est représentée l'évolution des condensateurs de puissance utilisés durant les quarante dernières années en France par EDF [1].

D'après ce tableau, nous remarquons que la technologie des condensateurs de puissance a connu deux étapes principales dans leur évolution. La première durant les années 70 par l'introduction des films de polypropylène ce qui a permis une nette augmentation du gradient de service et de la puissance unitaire et un fort abaissement du niveau des pertes diélectriques. La deuxième étape se situe à la fin des années 80 et est marquée par la mise sur le marché de liquides diélectriques non chlorés améliorant considérablement les caractéristiques des condensateurs. Nous examinons séparément les propriétés intrinsèques requises pour les diélectriques solides et liquides entrant dans la fabrication des condensateurs de puissance.

Tableau I.1

Année	Nature du diélectrique	Puissance unitaire [kVar]	Gradient de champ [V/ μm]	Tan d
1950	papier + huile minérale	20	12	$5 \cdot 10^{-3}$
1960	papier + PCB	20	15	$2 \cdot 10^{-3}$
		30	16	
		50	18	
1970	papier + polypropylène + PCB	100	38	$0,6 \cdot 10^{-3}$
1980	papier + polypropylène + liquides non chlorés	200	45	$0,4 \cdot 10^{-3}$
1989	polypropylène + liquides non chlorés	320	60	$0,1 \cdot 10^{-3}$

I.1.1a. Le diélectrique solide:

Les principales propriétés souhaitées pour les diélectriques solides sont les suivantes [2]:

- faible niveau de pertes diélectriques;
- forte rigidité diélectrique;
- grande résistance mécanique;
- excellente homogénéité superficielle;
- faible épaisseur.

A ces propriétés s'ajoutent les propriétés de compatibilité avec le liquide imprégnant (mouillabilité, insolubilité) et la stabilité thermique des caractéristiques diélectriques (permittivité et $\text{tg } \delta$) et leur invariance dans une large gamme de fréquence.

Le polypropylène (PP) s'est imposé comme le diélectrique le plus approprié pour les condensateurs de puissance. Nous rappelons dans le tableau I.2 ses principales caractéristiques [1, 2].

Tableau I.2

		20°C	80°C
Permittivité	50 Hz	2,2	2,15
	1 MHz	2,2	2,15
Tg δ	50 Hz	$< 2 \cdot 10^{-4}$	$< 2 \cdot 10^{-4}$
	1 MHz	$< 2 \cdot 10^{-4}$	$< 3 \cdot 10^{-4}$
Résistivité volumique Ωcm		$> 10^{17}$	$> 10^{16}$
Résistance à la traction [kg/cm ²]	non orienté	350	
	orienté	2100	

Les propriétés diélectriques du PP (permittivité et $\text{tg}\delta$) restent inchangées dans la gamme de température 20-80°C et de fréquence 50 Hz - 1 MHz. Etant donnée sa haute température de ramollissement et de fusion (140°C et 170°C respectivement), le polypropylène peut être utilisé à 100°C en permanence et à 120°C pendant de brèves périodes. L'orientation bi-axiale du PP améliore considérablement ses propriétés mécaniques et les données du tableau I.2 sont relatives à des films de PP bi-étiré.

I.1.1b. Le diélectrique liquide:

Le liquide d'imprégnation doit avoir les qualités suivantes [2]:

- forte rigidité diélectrique;
- stabilité thermique dans une large gamme de température;
- faible tension superficielle et une faible viscosité, ce qui améliore les propriétés de diffusion dans le solide (imprégnation);
- grande pureté ce qui entraîne une homogénéité et une bonne reproductibilité de la rigidité diélectrique;
- non polaire ce qui conduit à une faible dissociation d'espèces et conduit à sa faible contamination [3];
- non toxique et biodégradable et donc conforme à la loi en vigueur sur la protection de l'environnement;
- grand indice d'aromaticité ce qui lui confère de bonnes propriétés de gassing.

La tenue aux décharges des liquides utilisés comme imprégnant dans les condensateurs est l'une des propriétés qui nous intéresse plus particulièrement dans

le présent travail. Elle est souvent reliée à la propriété de génération et d'absorption de gaz formé dans le liquide appelée "gassing". Cette propriété, d'une grande importance dans les applications industrielles, dépend de la nature du liquide et du gaz. La mesure du gassing s'opère dans des conditions normalisées (test standard) [4] et consiste à mesurer la vitesse d'absorption ou d'évolution en $\mu\text{l}/\text{mn}$ d'un gaz injecté. Les gaz généralement injectés sont soit l' H_2 , soit l' N_2 .

Dans le tableau I.3 nous donnons les principales caractéristiques des liquides utilisés pour l'imprégnation des condensateurs tout-film à partir des années 1970.

Tableau I.3

nom commercial	formule chimique	nom chimique	producteur	viscosité à 20° cSt	permittivité à 20°C	taux d'aromaticité	tenue décharges
Jarytec	$\text{C}_{14}\text{H}_{14}$ et $\text{C}_{21}\text{H}_{20}$	mono et dibenzyltoluène	Prodelec	6,5	2,67	0,65	1
Condenser oils	$\text{C}_{16}\text{H}_{18}$	Phenyl Xylene Ethane	Nippon Oil Co	9,6	2,65	0,44	2
Baylectrol	$\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{O}$	Ditotyl Ether (DTE)	Bayer	5,8	3,5	0,57	3
Galden HT40	$(\text{C}_4\text{F}_8\text{O}_2)_n$	Perfluoropoly ether PFPE	Montefluos	50	2,08		4

Ces liquides sont tous non-polaires et leurs permittivités sont proches de celle du PP ce qui assure une répartition homogène du champ électrique entre le film et la couche de liquide. Leur comportement aux décharges est donné par un classement dans le sens décroissant de cette propriété. Ce classement a été établi sur la base de mesures de leur taux de gassing dans les conditions standard [4, 5] ou de leur tension d'apparition des décharges [6, 7]. Il a été montré qu'en général la faible amplitude des décharges et leur apparition à des niveaux de tension élevés sont associées à l'aromaticité élevée des liquides [18] et que dans le cas des imprégnants chlorés la tension d'apparition des décharges diminue avec l'augmentation du nombre d'atomes de chlore dans la molécule et avec l'augmentation de la permittivité [8].

L'interaction solide / liquide qui détermine la qualité de l'imprégnation est une étape décisive dans la technique de fabrication des condensateurs de puissance. Cette qualité est définie par la vitesse de diffusion du liquide et par sa quantité dans

le film. Elle correspond à une diffusion du liquide essentiellement dans la phase amorphe et obéit à la loi de diffusion de FICK [9]. Elle est quantifiée par la mesure de l'évolution du volume du film ou de son épaisseur et dépend, en plus de la nature du couple film / liquide, des conditions d'imprégnation (température, pression, durée) et du traitement thermique qui suit la phase d'imprégnation. N. BERGER et P. JAY [10] ont mis au point des méthodes de mesure du niveau d'imprégnation se rapprochant le plus possible des conditions réelles dans les condensateurs. Ces méthodes sont basées sur l'évolution de l'épaisseur, de la pression ou de la capacité d'un empilement de bobines de condensateurs.

I. 2. Différentes techniques de détection des décharges:

Suivant la nature de l'équipement à tester (nature du matériau, sa conception), la nature du test effectué (qualitatif, quantitatif) et de la sensibilité désirée, on utilise différentes méthodes de détection qu'on peut formellement classer en méthodes non-électriques et méthodes électriques. Souvent on utilise des méthodes combinées.

I.2.1: Méthodes non-électriques:

Les méthodes non-électriques de détection des décharges sont basées sur la manifestation non électrique de ces décharges qui peuvent être sous l'une des formes suivantes:

- a) Transformation physico-chimique: action des décharges sur la modification de la morphologie des matériaux;
- b) Variation de la pression dans l'appareil causée par les décharges: détection manométrique de la pression de gaz induit par les décharges;
- c) Echauffement du matériau: détection thermoélectrique de l'élévation de température due aux pertes diélectriques causées par les décharges;
- d) Emission d'ondes sonores: détection auditive ou microphonique du bruit dû aux décharges;
- e) Emission de lumière par les décharges.

Les méthodes basées sur les trois premières manifestations sont très peu sensibles et d'un emploi très restreint. Les méthodes sonores ont été largement employées pour la détection des décharges internes et superficielles dans les transformateurs, les condensateurs et dans les câbles. La sensibilité de la méthode dépend de la nature de l'équipement siège de décharges et de la distance entre le foyer de décharges et le détecteur. Elle peut atteindre 5 pC [11].

La détection des décharges à partir de la lumière qu'elles émettent est employée dans le cas des décharges de surface et des décharges internes dans les matériaux transparents [12]. L'utilisation des photomultiplicateurs, à gain élevé, permet d'avoir une plus grande sensibilité de détection des décharges surtout superficielles [13]. Enfin l'emploi d'intensificateur d'image a permis d'une part d'amplifier l'intensité de lumière émise et d'autre part de localiser la zone d'apparition des décharges. Les méthodes de détection basées sur la lumière émise sont souvent associées à des méthodes électriques.

I.2.2 Méthodes électriques:

Dans un récent travail, BARTNIKAS [14] a rappelé le développement des techniques de détection des décharges. Les premiers travaux ont commencé avec le développement du pont de Schering en 1920 qui a permis de mesurer l'influence des décharges sur le facteur de pertes diélectriques $\text{tg}\delta$. L'invention du tube cathodique a permis l'introduction de l'oscilloscope en 1932 par Gemant et Van Philipoff dans la visualisation de la forme du signal électrique dû à la décharge. A partir de 1950, un certain nombre de détecteurs de décharges ont été commercialisés.

a) Principe de détection électrique:

Un dispositif de mesure des décharges peut être représenté par le schéma de base de la figure I.1. Il est composé d'une source de haute tension de préférence dépourvue de décharges, de la capacité C_x de l'échantillon source de décharges, d'une impédance Z aux bornes de laquelle on mesure l'impulsion causée par la décharge et d'un condensateur de couplage C_c qui facilite le passage des signaux de haute fréquence et qui est du même ordre de grandeur que la capacité de l'échantillon C_x . Le signal de la décharge est mesuré après amplification (A) à l'aide d'un détecteur D. Tous les appareils de mesure sont dérivés de ce montage de base et diffèrent essentiellement par la nature de l'impédance Z (RC ou RLC) et par son mode de branchement (en série ou en parallèle avec C_x) [11].

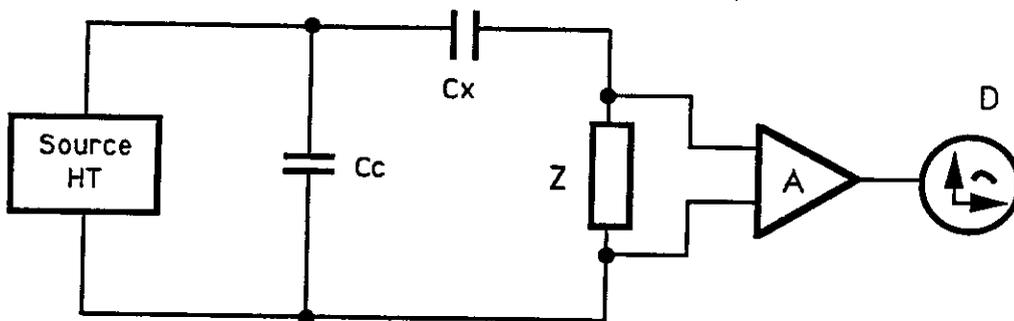


Figure I.1: Schéma de base d'un dispositif de détection électrique de décharges.

b) Charge transférée:

En se limitant au cas d'une décharge dans une inclusion gazeuse d'épaisseur e_g placée dans un milieu diélectrique homogène de permittivité relative ϵ_s , celui-ci peut être modélisé par le schéma équivalent A-B-C de la figure I.2. Dans ce schéma, C est la capacité du condensateur de l'interstice source de décharges (simulant un défaut), B est la capacité du milieu diélectrique en série avec le défaut et A représente la capacité de l'isolant non soumis aux décharges. Si e_s est l'épaisseur du diélectrique en série avec l'inclusion gazeuse, en absence de décharge, pour une tension appliquée V ; la tension U aux bornes de C pour une répartition capacitive, vaut:

$$U = V / (1 + e_s / \epsilon_s e_g)$$

et la charge à ses bornes dans ce cas est $Q = CU$. Si la tension U dépasse la tension d'amorçage (tension de Paschen dans le cas d'un gaz), une décharge d'amplitude réelle q a lieu dans C (figure I.3 a) et une charge apparente q_a circule dans le circuit extérieur (détecteur) pour maintenir V à sa valeur initiale et donc compenser la chute de tension δV (figure I. 3.b) ($\delta V = V_a - V_e$ où V_a et V_e sont respectivement les tensions d'allumage et d'extinction). En supposant que le champ dans la cavité est uniforme et que la charge concerne toute la cavité, la tension appliquée s'écrit alors:

$$V = (Q + q_a) / B + (Q + q_a - q) / C$$

et la charge apparente est:

$$q_a = q B / (B + C).$$

Pour une inclusion gazeuse d'épaisseur $5 \mu\text{m}$ entre deux films de polypropylène de $13,6 \mu\text{m}$ d'épaisseur, la charge apparente est égale à environ $q/4$. En général donc, la charge apparente d'une décharge dans un matériau diélectrique qui présente un défaut quelconque ne constitue qu'une image de la charge réelle et donc de l'énergie de la décharge pouvant conduire à la détérioration du matériau, et cette seule charge ne peut être un indice révélateur du type de défaut.

c) caractéristiques d'un dispositif de détection:

Chaque dispositif est caractérisé par sa sensibilité et sa résolution. La sensibilité est définie comme le rapport de la valeur minimale du signal mesuré au signal d'interférence (bruit). La bande passante de l'amplificateur doit être égale à la fréquence correspondant au maximum du signal aux bornes de Z. La résolution d'un

fréquence correspondant au maximum du signal aux bornes de Z. La résolution d'un appareil est l'intervalle de temps minimum qui sépare deux décharges successives. Elle est aussi définie comme le nombre de décharges par demi-période de 50 Hz. Elle dépend de la constante de temps du circuit oscillant (Z), de la bande passante de l'amplificateur et du temps de réponse du détecteur. Comme nous venons de le remarquer dans le paragraphe précédent, la sensibilité et la résolution des différents dispositifs dépendent aussi de la capacité de l'échantillon à tester. Des travaux sur le calibrage des différents éléments constituant le circuit détecteur ont été publiés par CURDTS [15], STARR [16] et KREUGER [11].

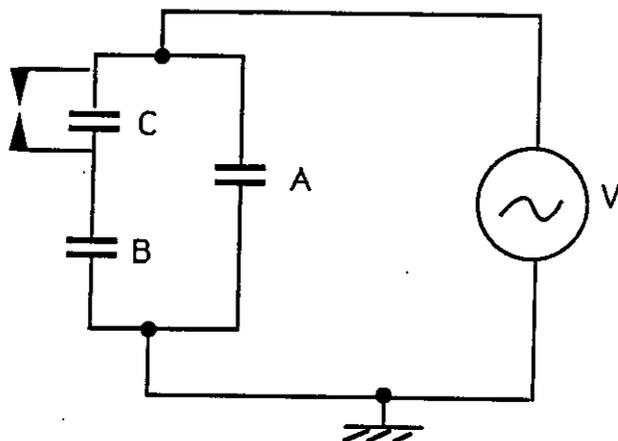


Figure I.2: Schéma équivalent d'un diélectrique source de décharges.

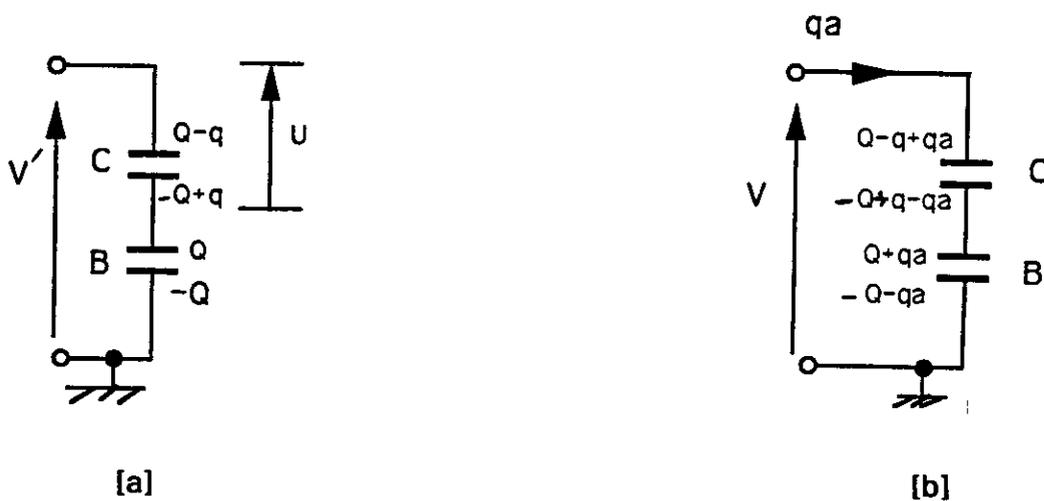


Figure I.3: Schémas illustrant la relation entre charge réelle et charge apparente:
 a) situation lors de la décharge dans C
 b) situation après la décharge.

1.3. Méthodes d'analyse des décharges:

Le développement des dispositifs de détection des décharges de plus en plus performants a permis d'accéder à un très grand nombre de données et leur traitement devient plus complexe, d'où l'intérêt accordé à la mise en oeuvre de méthodes d'analyse et d'exploitation de ces données. Les différentes méthodes restent cependant adaptées à des conditions expérimentales particulières et il est très difficile de faire une synthèse des différents travaux. Dans ce paragraphe nous citons les principaux travaux marquant l'évolution des méthodes d'analyse durant les dernières années. Ces méthodes ont pour but d'étudier l'évolution des différentes grandeurs caractéristiques des décharges, de mieux qualifier la nature de ces décharges (leur source) et les relier à l'état de l'isolation de l'appareil testé et donc d'apprécier leur nocivité. Elles doivent aussi permettre de mieux comprendre les mécanismes de la physique des décharges.

En 1976 AUSTIN et JAMES [17] ont développé un système de détection de décharges intégrant un logiciel permettant la représentation très fine des différentes grandeurs caractéristiques, notamment le nombre de décharges par cycle en séparant leur signe, le temps d'apparition de la première décharge par cycle et leur évolution dans le temps. TANAKA et al [18] en 1978 ont introduit la représentation de la charge moyenne par phase et le nombre moyen d'impulsions par phase (ϕ -q et ϕ -n), où f est la position dans la période qui compte 200 divisions. SCHIFANI [19] en 1986 a introduit les histogrammes de l'amplitude des décharges et de leur énergie apparente sur un certain nombre de cycles.

Les méthodes précédentes sont toutes basées sur des paramètres soit mesurés (charge apparente, phase d'apparition) soit déduites (tension instantannée d'amorçage, valeurs moyennes, énergie apparente). Sachant que pour qu'une avalanche électronique puisse être déclenchée dans un gaz, il faut d'une part que le champ électrique dépasse une certaine valeur critique et d'autre part qu'il existe un électron initiateur d'avalanche dans ce champ. Dans une isolation ces deux conditions nécessaires pour déclencher des décharges sont des grandeurs statistiques, d'où l'intérêt que peut avoir une approche stochastique des décharges [20]. En 1990, KREUGER et al [21] ont introduit des paramètres statistiques pour tenir compte de la nature sporadique et discontinue des décharges. Ces paramètres caractérisent l'asymétrie et la planitude des distributions ϕ -q et ϕ -n par rapport à une distribution normale. Ceux sont:

$$\text{le skewness } S_k = [\sum (x_i - \mu)^3 P_i] / \sigma^3$$

$$\text{et le kurtosis } K_u = [\sum (x_i - \mu)^4 P_i] / \sigma^4 - 3$$

x_i est la valeur discrète, μ la valeur moyenne de la distribution, σ l'écart-type de la distribution et P_i la probabilité de l'évènement x_i . Nous détaillerons le calcul des différents paramètres dans le chapitre suivant de ce travail. Ces paramètres ont été utilisés pour la reconnaissance des sources de décharges par comparaisons successives de la distribution avec des distributions type préalablement enregistrées [22]. KOMORI et al [23] ont mis au point un modèle d'identification permettant l'évaluation du degré de dégradation d'une isolation. Ce modèle consiste à normaliser cinq types de représentation ϕ -q-n notées de A à E correspondant chacune à un niveau de dégradation et à chercher le degré de similarité entre la distribution des décharges de l'échantillon à tester avec celles normalisées. Le degré de similitude entre la distribution des décharges dans un échantillon X et la représentation Standard a pour expression :

$$S_d(A, X) = 1 - [D_p(A, X)] / D_p(A, X) + \dots + D_p(E, X)$$

où $D_p(A, X)$ est la distance entre le modèle standard A et le modèle en question X. Le degré de dégradation est déterminé par le maximum parmi les cinq degrés de similitude $S_d(A, X)$, $S_d(B, X)$, ..., $S_d(E, X)$.

1.4. Décharges dans les condensateurs de puissance:

Peu de travaux ont porté sur l'étude des décharges dans ces condensateurs dont la structure est complexe et donne lieu à plusieurs foyers de décharges. Dans ces condensateurs, les décharges apparaissent en général soit dans le volume du matériau soit en bord d'armature. Le premier cas est souvent dû à une défaillance au niveau de l'imprégnation ou du dégazage du liquide et représente environ 10% des causes de détérioration des condensateurs. Le second type de décharges apparaît dans des zones de renforcement de champ électrique (bords d'armature) et représente 90% des sources de décharges dans les condensateurs [24]. L'étude des décharges dans les condensateurs est abordée sous quatre aspects différents:

- a) les techniques de mesure utilisées: ces techniques ont été discutées dans la première partie de ce chapitre;
- b) effet de la conception des condensateurs sur le niveau des décharges: influence de la nature des matériaux entrant dans la fabrication (film et liquide imprégnant), leur paramètres géométriques (épaisseur, géométrie d'électrodes) et leurs conditions d'exploitation (température, pression, humidité);

c) effet des décharges sur la performance des condensateurs : action des décharges sur l'évolution des propriétés diélectriques (niveau des pertes diélectriques, rigidité diélectrique) et donc sur la durée de vie des condensateurs.

d) normalisation des essais: chercher à mettre au point des conditions standard d'essai des condensateurs tenant compte des conditions de leur exploitation (commutation fréquente, surtension atmosphérique et de manoeuvre,...). Les essais sont de deux types: décharges sous l'action d'une brève surtension (transit overvoltage TOV) et décharges sous une surtension permanente (permanent overvoltage POV).

Une étude des décharges partielles dans des isolations au papier imprégné d'huile pour cables et condensateurs [25] entre électrodes à arêtes vives a permis la définition de deux seuils de décharges: Une tension initiale de décharges de faible intensité n'entraînant aucun dommage appréciable du condensateur et une tension critique de décharge de forte intensité entraînant la détérioration des condensateurs même à court terme. D'où la définition d'un gradient d'essai des condensateurs qui doit être inférieur au champ critique d'apparition des décharges de second type ($E_{\text{test}} \leq 0,7 E_{\text{cr}}$).

L'influence de la nature du liquide imprégnant sur les décharges dans des films de polypropylène entre films d'aluminium a été mise en évidence [5]: Plus l'aromaticité du liquide est grande, plus l'amplitude des décharges et leur fréquence est faible. La température n'influe pratiquement pas sur la tension d'initiation des décharges (entre -20°C et $+80^{\circ}\text{C}$).

L'identification d'un condensateur source de décharges parmi un ensemble interconnecté de condensateurs a été possible par la mesure du courant induit par les impulsions de décharges à l'aide d'un transformateur de courant à haute fréquence [26]. Ce courant (donc l'amplitude des décharges) décroît en s'éloignant du condensateur source de décharges.

Conclusion:

Nous avons montré dans cette étude bibliographique que les décharges électriques dans les isolations imprégnées reste un sujet d'actualité et d'un grand intérêt aussi bien scientifique qu'économique. Le développement de l'outil informatique a ouvert l'horizon à d'autres approches d'étude et de diagnostic. Notre présente étude s'inscrit dans cette démarche.

BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE I

- [1] R. FOURNIE
Les isolants en electrotechnique: essais, mécanismes de dégradation et applications industrielles.
Editions Eyrolles, Paris 1990.
- [2] D. ZANOBETTI, G. A. GERTSCH, R.J. HOPKINS, A. RABANIT,
and K. WENZEL
Condensateurs de puissance à diélectrique mixte papier-polypropylène.
Comité d'études n° 15 de la CIGRE (1970).
- [3] M. NEMAMCHA
Etude de l'injection d'ions dans les liquides diélectriques par modification des propriétés volumiques et interfaciales.
Thèse de Doctorat de l' INPG Grenoble 1986.
- [4] P. BEZBOREDKO, O. LESAIN and R. TOBAZEON
Study of partial discharges and gassing phenomena within gaseous cavities in insulating liquids.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol.27, N°2 p. 287-297, April 1992.
- [5] J. H. STAIGHT
Determining the partial discharge inception characteristics of capacitor impregnant.
4th Inter. Conf. on Dielec. Mater. Measur. and Appl., p. 137-140; 10-13 sept. 1984.
- [6] C. MAZZETTI, M. POMPILI, R. CECERE and E.O. FORSTER
The effect of molecular structure of dielectric fluids on their conduction and breakdown.
9th Inter. Conf. on Cond. and Break. of Dielec. Liquids; p. 557-562; Grenoble 1990.

- [7] C. MAZZETTI, M. POMPILI and E.O. FORSTER
Electrical conduction, breakdown and partial discharge in dielectric liquids.
Proc. of the 3rd Int. Conf. on Prop. and Appl. of Dielec. Mat.; p. 261-263; July 8-12, 1991; Tokyo.
- [8] H. F. CHURCH
Partial discharge phenomena in power capacitors.
CIGRE study comitte N°15 (1971).
- [9] A. SAAD
Conduction électrique superficielle et volumique de films de polymères au contact de liquides isolants.
Thèse de Docteur Es-Sciences Physiques ; Grenoble 1986.
- [10] N. BERGER and P. JAY
Impregnant-polypropylene interactions in all film capacitor configuration.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol.EI 22, Nb4, p. 383-388; August 1987.
- [11] F.H.KREUGER
Partial discharge in high voltage equipment.
Butterworths et co Ltd (1989).
- [12] BERTEIN and B. FALLOU
Rapport CIGRE 1980.
- [13] F.H.KREUGER
Optical detection of surface discharges.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. 23, N°3, june 1988.
- [14] R. BARTNIKAS
Detection of partial discharges (corona) in electrical apparatus.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. 25, N°1; p. 114-124, February 1990.
- [15] E.B. CURDTS
Engineering Dielec. Vol.1 Corona measurment and interpretation.
ASTM 1979.

- [16] W.T. STARR
Engineering Dielec. Vol.1 Corona measurment and interpretation.
ASTM 1979.
- [17] J. AUSTIN and R.E. JAMES
On-line digital computer system for measurement of partial discharges in
insulation structure.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol.EI 11, Nb4; p. 129-139, December 1976.
- [18] T. TANAKA and T. OKAMOTO
A minicomputer-based partial discharge measurement system.
Proc. IEEE Int. Conf. on Elec. Insul. p. 86-89; 1978.
- [19] R. SCHIFANI
A novel histogram for partial discharge signals in HV insulating systems.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol.EI-20, Nb1; p. 89-99, February 1986.
- [20] R.J. VAN BRUNT
Stochastic properties of partial-discharge phenomena.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol.26, Nb5; p. 902-948, October 1991.
- [21] E. GULSKI, P.H.F. MORSHUIS and F.H.KREUGER
Automatized recognition of partial discharges in cavities.
Jap. J. of Appl. Phys. vol.29; nb7, july 1990; p. 1329-1335.
- [22] E. GULSKI and F.H.KREUGER
Recognition of discharges sources using statistical tools.
Proc. of the 3rd Int. Conf. on Prop. and Appl. of Diel. Mat. July 8-12; p. 39-42,
1991 Tokyo.
- [23] F. KOMORI, N. NISHIGUCHI, M. HIKITA and T. MIZUTANI
Construction of prototype on-line expert system for insulation degradation
diagnostics of polymer insulation material suffering partial discharge (PD).
Proc. of the 4th Int. Conf. on cond. and Break. in solid Diel., Setri-Levante
(Italy) June 22-25, 1992.

- [24] W. J. SARJEANT
Polymer laminate structures.
Appl. Phys. Comm., 3 (1 et 2); p. 83-167 (1983).
- [25] G.S. KUTCHINSKI, D.A. KAPLAN, Y.S. PINTAL, I.S. PERESELENTSEV,
S.K. MEDVEDEV, G.T. MESSERMAN et A.K. MANN
Décharges partielles et durée de vie de l'isolement des condensateurs.
C.I.G.R.E. Session de juin 1966.
- [26] K. MALLIKARJUNAPPA and M.C. RATRA
On-line monitoring of partial discharges in power capacitors using high
frequency current transformer technique.
Proc. of the 3rd Int. Conf. on Prop. and Appl. of Dielec. Mat. July 8-12,
1991; Tokyo.

CHAPITRE 2

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Introduction:

Dans cette partie, nous décrivons d'abord le dispositif de détection et d'analyse des décharges, nous présentons ensuite le montage de visualisation de la lumière émise, enfin nous détaillerons la structure du programme d'exploitation des résultats.

I. Dispositif de détection (fig.1):

Il se compose d'une source de haute tension alternative, d'une cellule d'étude, d'une tête amplificatrice, d'un circuit de détection et de mesure de la charge et d'un micro-ordinateur muni d'une interface et des programmes d'acquisition et de traitement des résultats.

I.1: Source de HT:

Elle est composée d'un générateur BF, d'un amplificateur de puissance et d'un transformateur 20 kV, dépourvu de décharges jusqu'à 12 kV. Elle délivre un signal 50 Hz (ajustable de 30 à 400 Hz) et d'amplitude variable de 0 à 20 kVeff.

I.2: Cellule d'étude:

C'est un dispositif à deux électrodes entre lesquelles se trouve le diélectrique à étudier.

I.3: Tête amplificatrice (fig. 2):

Elle comprend une impédance de mesure RLC, en série avec la cellule d'étude, un atténuateur et un amplificateur de mise en forme.

a) L'impédance de mesure:

Les éléments R, L et C sont calculés de telle sorte que le signal à mesurer soit d'une part supérieur au signal de bruit et d'autre le plus élevé possible pour permettre un maximum de sensibilité. En régime permanent, le courant capacitif traversant la cellule génère aux bornes de l'impédance un signal de même fréquence (50 Hz) et d'amplitude variable en fonction de la capacité de la cellule. Ce signal constitue un bruit par rapport au signal à mesurer. Pour une capacité d'environ 100 pF et une tension efficace au secondaire du transformateur de 10 kV, ce bruit est de l'ordre de

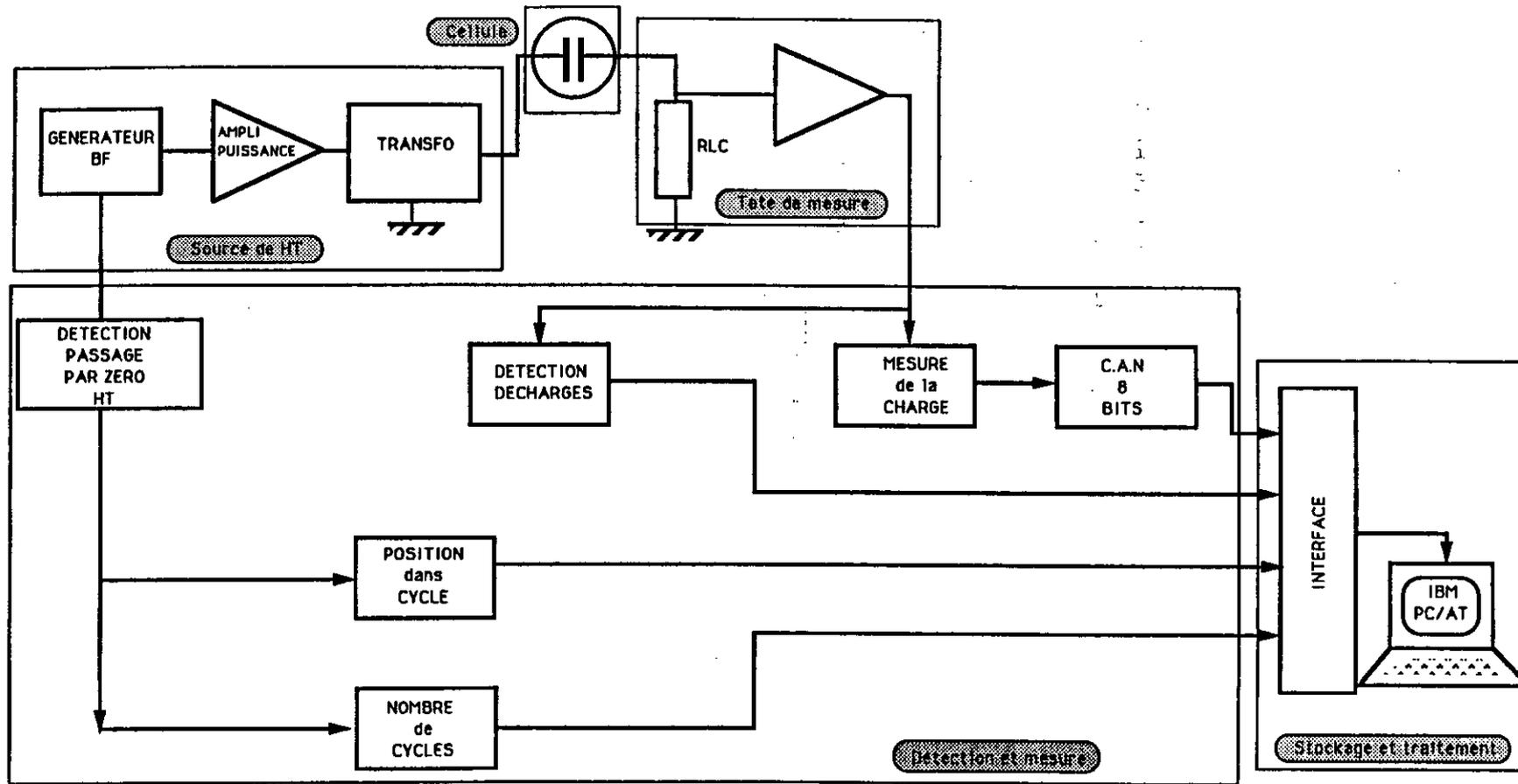


Figure 1: Schéma-bloc du dispositif de détection des décharges.

20 μV . Il est donc nécessaire d'avoir un signal à mesurer $> 20 \mu\text{V}$ (10 fois), ce qui limite les possibilités de mesure à des charges d'amplitude plus grande que 0,002 pC. En pratique, compte tenu des bruits électromagnétiques ambiants, on se limite à des mesures de charge de 0,2 pC. Au signal 50 Hz, se superpose le signal de décharge qui est un signal de haute fréquence qu'on peut assimiler à une impulsion de Dirac. Cette impulsion charge le condensateur C qui donne un signal oscillant dans le circuit RLC avec une pseudo-période de l'ordre de 1MHz. Les éléments du circuit sont tels que le signal soit en régime d'amortissement critique. Une image de ce signal est représentée sur la figure 3, courbe a.

b) L'atténuateur:

Un commutateur à l'entrée permet de choisir entre deux gammes de mesure. Les valeurs des résistances du diviseur de tension permettent d'obtenir un rapport 20 entre les deux gammes. Le circuit est protégé contre les claquages dans la cellule par une double diode transil et une résistance de 10 Ω qui joue le rôle de fusible.

c) L'amplificateur:

Le signal issu du commutateur est amplifié à l'aide de trois amplificateurs opérationnels, un LT1028 et deux LF356. Deux filtres passe-haut à fréquence de coupure égale à 10^5 Hz effectuent un filtrage supplémentaire du 50 Hz et une diminution du bruit thermique par réduction de la bande passante.

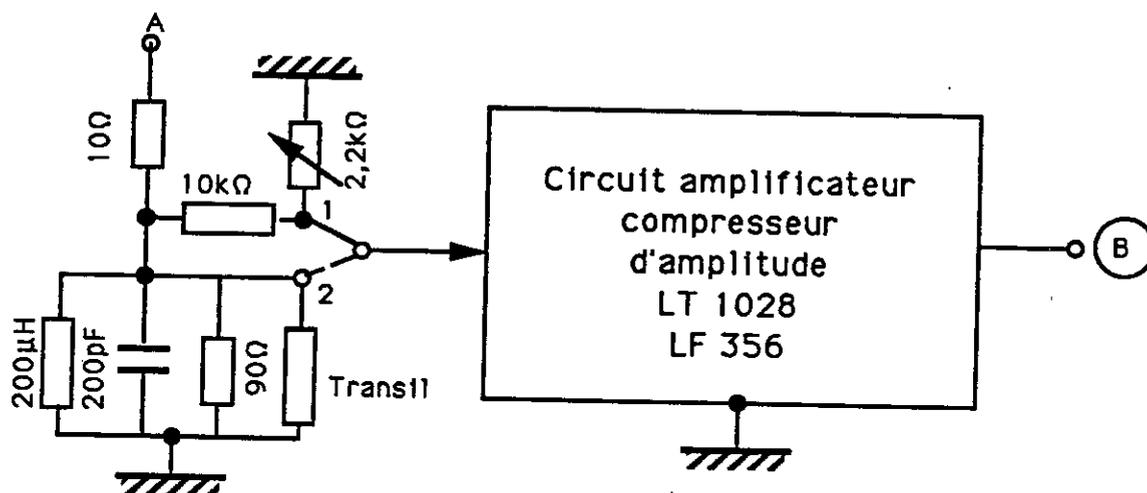


Figure 2: Schéma de la tête d'amplification et de mesure

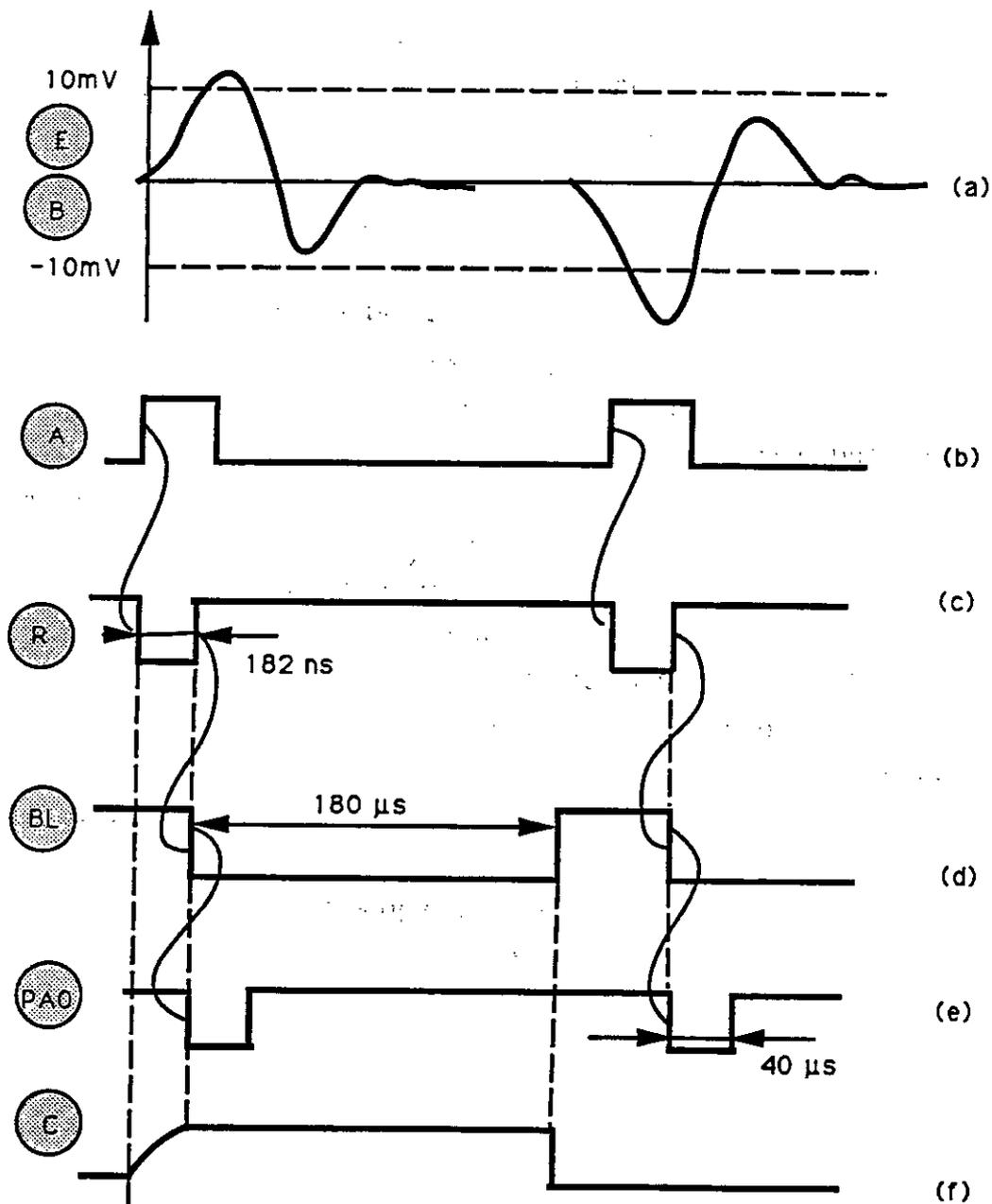


Figure 3: Forme des signaux en différents points du circuit de détection et de mesure de la charge.

1.4. Circuit de détection et de mesure de la charge:

La détection des décharges est effectuée par le circuit LM711 (figure 4). Ce circuit réunit dans le même boîtier deux comparateurs, le premier (A) pour la détection des décharges positives et le second (B) pour la détection des décharges négatives. Le seuil de détection des décharges positives est défini par un potentiomètre diviseur ajusté de telle sorte que le niveau soit supérieur au niveau de bruit de la chaîne de mesure. Un pont diviseur identique, mais alimenté par une tension négative définit un seuil symétrique pour le comparateur B. Les deux comparateurs sont couplés en sortie de telle sorte qu'une décharge positive ou négative déclenche le monostable n°1 du circuit LS221 (figure 3c). Ce monostable déclenche lui-même le monostable 2 du même boîtier après un retard de 180 ns environ, de telle sorte que le front descendant (signal BL de la figure 3d), corresponde au maximum du signal E (figure 3a). Ce signal BL est appliqué à l'échantillonneur-bloqueur servant à maintenir en sortie la valeur de la tension E (valeur max) le temps nécessaire à la conversion analogique - numérique (180 μ s) (figure 3e). Un troisième monostable déclenché par le précédent délivre un signal de 40 μ s (signal PA0 figure 3e), destiné à la carte d'interface située dans le micro-ordinateur. L'ensemble permet des mesures de charges de 0,2 à 200 pC.

Par ailleurs le signal issu du générateur BF, après passage par un circuit comparateur à tension de référence nulle LM710, est appliqué à une boucle d'asservissement de fréquence (VCO 4046: Voltage Control Oscillation) (figure 5). Cette boucle se compose d'un oscillateur dont la fréquence est contrôlée par une tension, d'un comparateur de phase et d'un ensemble de compteurs situés sur la carte d'interface et permettant de diviser la fréquence de l'oscillateur par 250. Le comparateur de phase délivre une tension permettant de corriger la phase de l'oscillateur en fonction de son écart par rapport à la phase du signal pilote C1 (50 Hz). Cette boucle d'asservissement de phase permet d'obtenir en sortie de l'oscillateur un signal VCO synchrone dont la fréquence est 250 fois la fréquence du signal pilote.

Trois registres sur la carte d'interface, accessibles par programme à partir du micro-ordinateur, permettent de lire:

- a) l'état du système de détection des décharges,
- b) l'état courant au moment d'une décharge des compteurs diviseurs par 250,
- c) l'état courant au moment d'une décharge des compteurs du nombre de cycles,
- d) la valeur de l'octet représentant la charge.

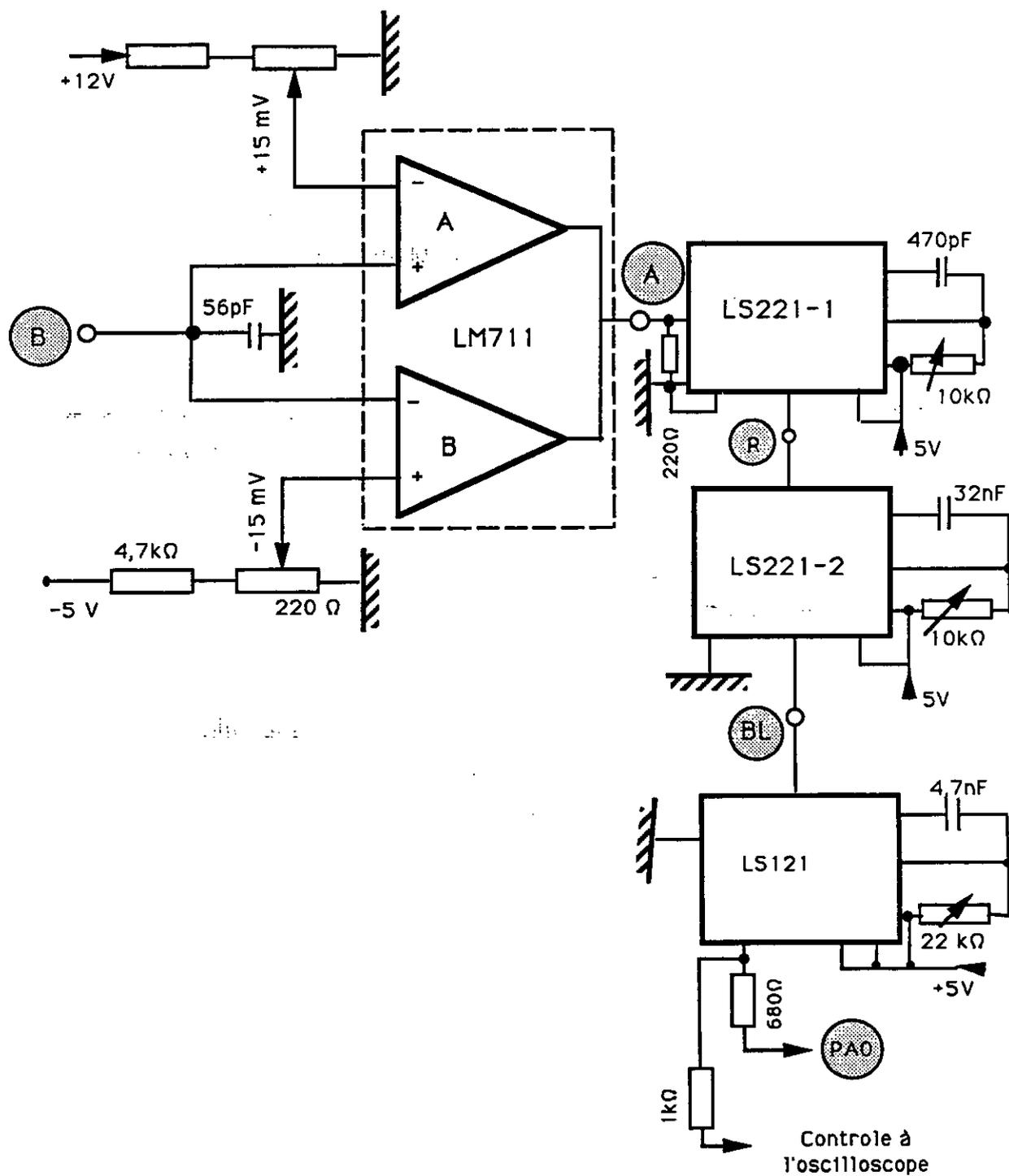


Figure 4: Circuit de détection et de mesure de la charge.

Les valeurs relatives à une décharge d'amplitude q_i , qui a eu lieu en position i dans le cycle j , constituent la matrice des données que nous exploitons par la suite.

II. Montage d'intensification d'image:

Pour une visualisation directe des zones de décharges, nous avons utilisé un montage conçu pour la visualisation des streamers dans les liquides diélectriques [1] et schématisé sur la figure 6. Ce montage se compose de deux intensificateurs d'image, non obturables (visualisation en continu), en série (type Thomson CSF TH9304V1) dont la rémanence est de 0,3 ms. Un système optique composé de deux lentilles de focales 50 mm et de grandes ouvertures (1:1,4) achemine la lumière sur l'intensificateur d'image. Des lentilles identiques permettent de focaliser l'intensité lumineuse sur la photocathode de la caméra.

III. Programme d'exploitation des décharges:

III. 1: Structure du logiciel:

La structure générale du logiciel d'exploitation est représentée sur le tableau 1. Pour comprendre les différentes procédures de traitement, considérons le schéma de la figure 7, où nous montrons une tension sinusoïdale sur un certain nombre de cycles j et chaque cycle comprend i positions ($i = 1$ à 250). Chaque décharge est définie par son amplitude q_i , son numéro de cycle j et sa phase ϕ_i dans le cycle. Ce sont ces éléments que nous utiliserons pour l'analyse des décharges. Pour chaque procédure, nous détaillons le calcul et nous donnons un exemple de la représentation.

III. 2: Différentes procédures:

III.2.1: Graphes par série $F(\phi)$:

a) $n(\phi)$ et $q(\phi)$: Ce sont respectivement le nombre de décharges et la charge moyenne par position, calculés pour un certain nombre de cycles (ou un certain temps d'application de la tension). Nous séparons les décharges positives et négatives. Ainsi pour chaque phase ϕ_i , nous aurons:

$$\begin{aligned} n_+(\phi_i) &= \sum n_{+k} \text{ et} & q_+(\phi_i) &= \sum (q_k/n_{+k}) \\ n_-(\phi_i) &= \sum n_{-k} \text{ et} & q_-(\phi_i) &= \sum (q_k/n_{-k}) \end{aligned}$$

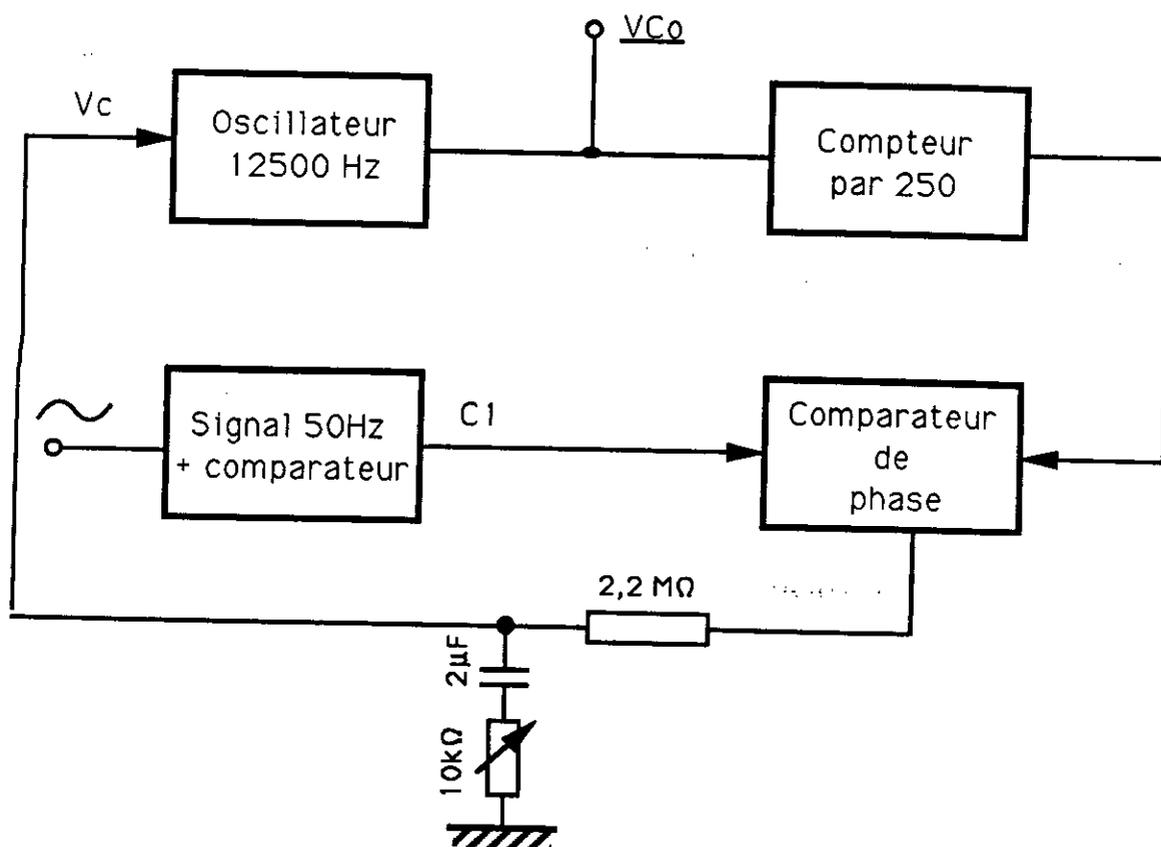


Figure 5: Schéma de la boucle d'asservissement de fréquence.

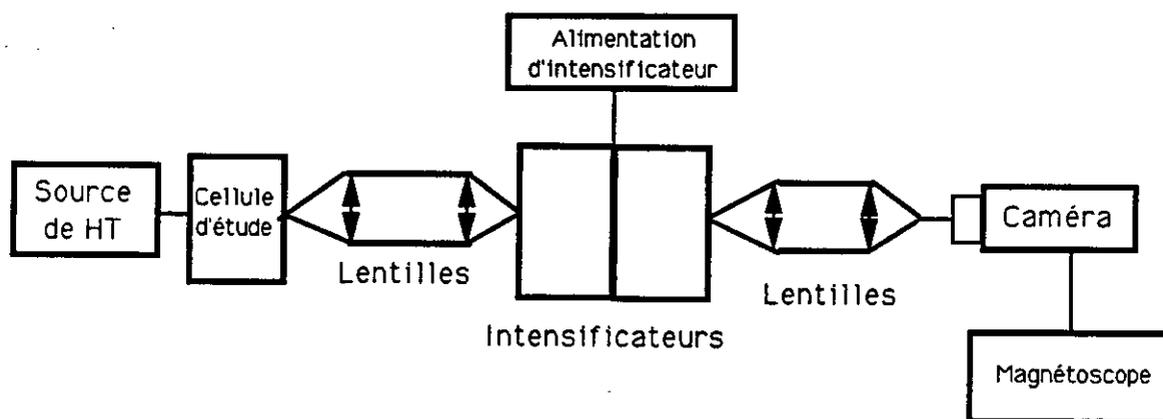


Figure 6: Schéma du montage intensificateur d'image.

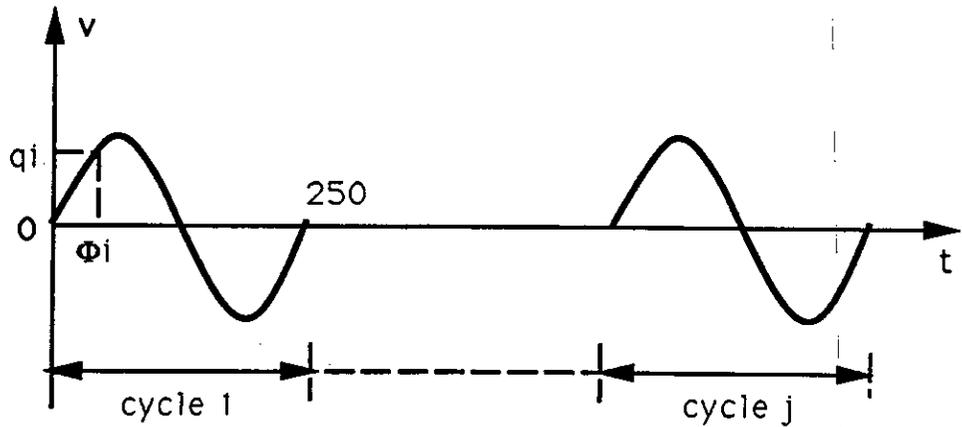


Figure 7: Représentation des différentes grandeurs mesurées d'une décharge (q_i , ϕ_i , cycle j).

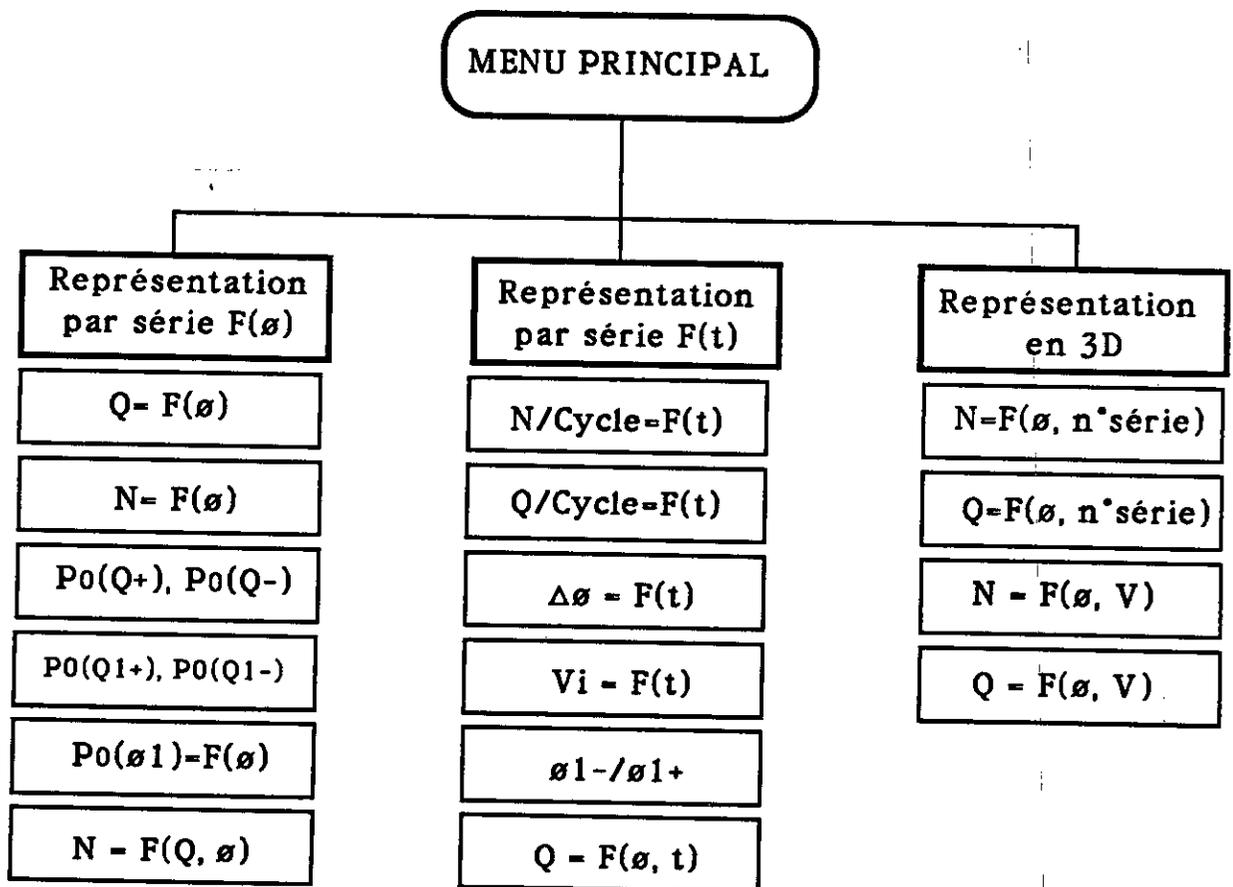


Tableau 1: Structure du logiciel d'analyse des décharges.

n_{+k} et n_{-k} sont respectivement le nombre de décharges positives et négatives par phase i sur un nombre de cycle k . Sur les figures 8a et 8b, nous donnons un exemple des représentations $n(\phi)$ et $q(\phi)$, où nous pouvons remarquer que dans une position, il y a eu au maximum 25 décharges et la charge moyenne par position atteint 4 pC. La combinaison de ces deux distributions, nous donne une représentation en 3D de $n=f(\phi, q)$ d'où nous pouvons déduire pour chaque phase le nombre et la charge moyenne des décharges.

b) $P_0(q_+)$ et $P_0(q_-)$ sont les probabilités pour que les décharges aient une amplitude q_+ et q_- respectivement. Ces probabilités sont calculées pour un échantillon composé de toutes les décharges positives et négatives et sont normalisées par rapport à leurs valeurs maximales. A partir des distributions $P_0(q_+)$ et $P_0(q_-)$, on peut déduire l'amplitude la plus probable des décharges positives et négatives correspondant à $P_0(q_+)=1$ et $P_0(q_-)=1$. Pour un échantillon de n_i décharges d'amplitude q_i parmi les Σn décharges de même signe, $P_0(q_i) = n_i q_i / \Sigma n$. Ce calcul est effectué sur chaque fenêtre q_i dont l'incrément (intervalle δq entre q_i et q_{i+1}) n'est pas toujours linéaire et dépend de la technique de détection (type d'amplificateur). Sur les figures 9a et 9b, est donné un exemple des variations $P_0(q_+)$ et $P_0(q_-)$ où nous remarquons que la charge positive la plus probable est égale à 1,7 pC et la charge négative la plus probable est environ 1,5 pC.

c) $P_0(q_{1+})$ et $P_0(q_{1-})$: Dans la procédure précédente, si nous ne prenons en considération que les premières décharges positives et négatives par cycle, nous pouvons déduire les probabilités pour que ces décharges aient une amplitude q_{1+} et q_{1-} . Ces probabilités sont calculées de la même manière que les précédentes. Sur les figures 9c et 9d, nous remarquons que les maximums de $P_0(q_+)$ et $P_0(q_-)$ sont égaux à ceux de $P_0(q_{1+})$ et $P_0(q_{1-})$, ce qui correspond au cas où il y a une seule décharge par 1/2 période ou bien différentes décharges mais de même amplitude.

d) $P_0(\phi_{1+})$ et $P_0(\phi_{1-})$: Ce sont les probabilités d'apparition des premières décharges positives et négatives pour chaque phase ϕ_i . Ces probabilités sont normalisées par rapport à leurs valeurs maximales (figure 10a et 10b). Dans cet exemple, la phase la plus probable d'apparition des décharges positives est environ 13° et celle des décharges négatives est égale à 193° .

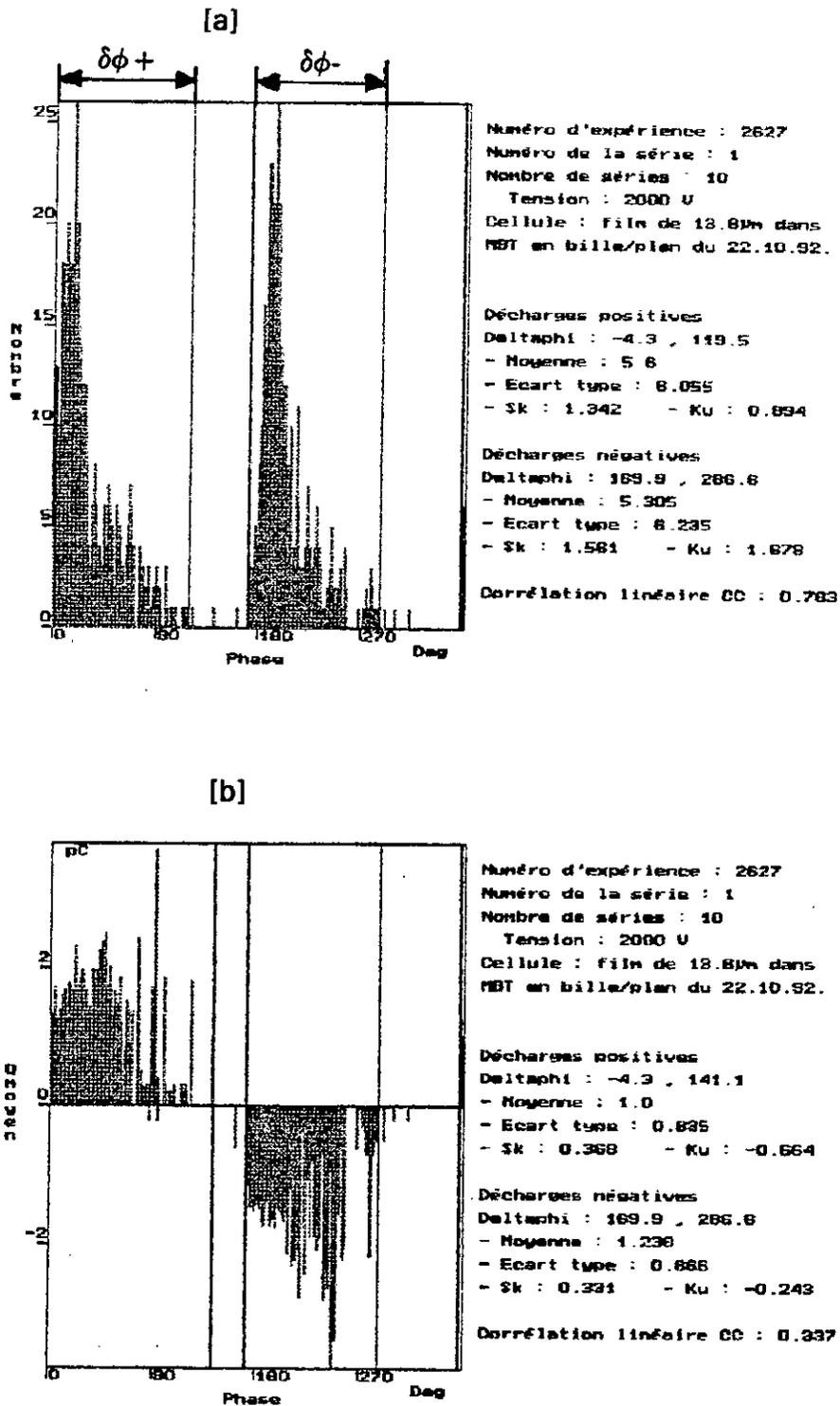


Figure 8: Distribution du nombre de décharges positives et négatives (a) et de la charge moyenne positive et négatives (b) par phase. PP imprégné de MBT en géométrie sphère/plan; $V = 2$ kVeff.

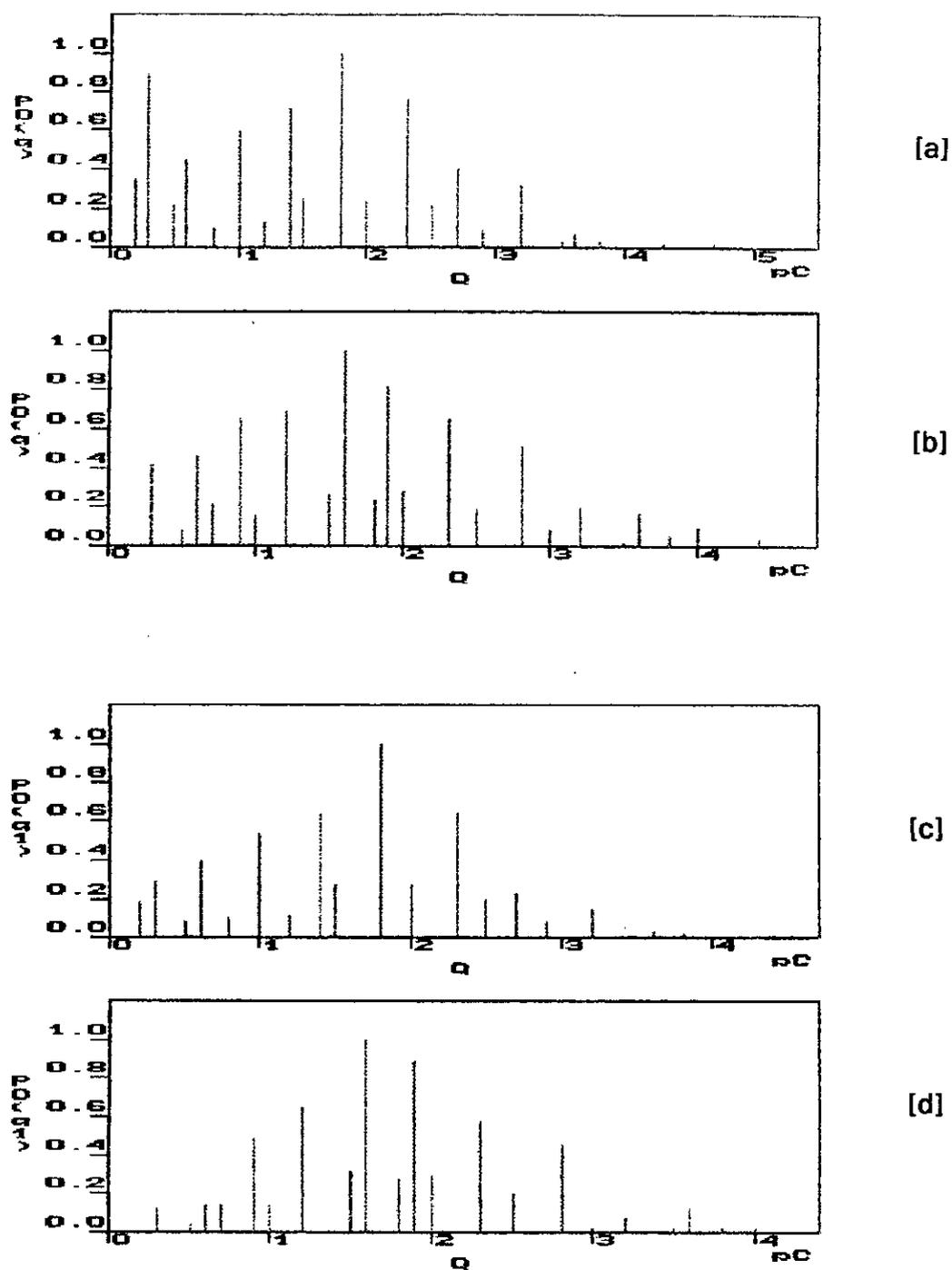


Figure 9: a) Probabilité de l'amplitude des décharges positives;
 b) Probabilité de l'amplitude des décharges négatives;
 c) Probabilité de l'amplitude des premières décharges positives;
 d) Probabilité de l'amplitude des premières décharges négatives.

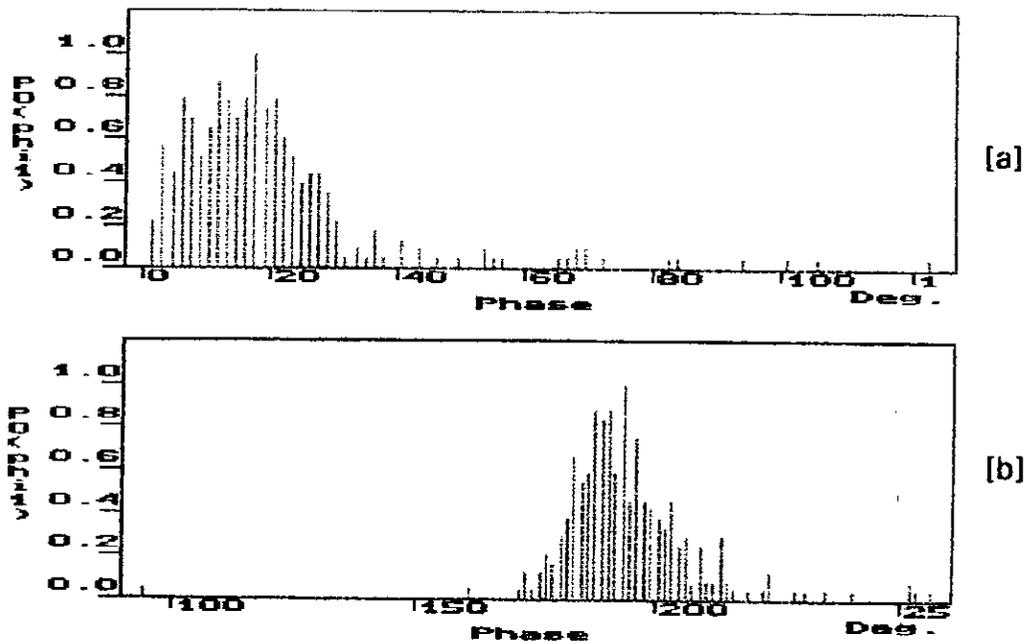


Figure 10: Probabilité de la phase d'apparition des décharges positives (a) et négatives (b).

e) Forme d'une distribution, relation entre deux distributions: Pour caractériser les distributions $n(\phi)$ et $q(\phi)$, nous utilisons les paramètres statistiques Sk et Ku [2] qui sont respectivement le coefficient d'assymétrie (skewness) et le coefficient d'aplatissement (kurtosis). Ces coefficients permettent de comparer une distribution donnée à une distribution normale.

$$Sk = \frac{\sum(x_i - \mu)^3 P(x_i)}{\sigma^3} = \frac{1}{n} \sum \left[\frac{(x_i - \mu)}{\sigma} \right]^3$$

$$Ku = \left[\frac{\sum(x_i - \mu)^4 P(x_i)}{\sigma^4} \right] - 3 = \left\{ \frac{1}{n} \sum \left[\frac{(x_i - \mu)}{\sigma} \right]^4 \right\} - 3$$

x_i est l'évènement x ayant lieu à la phase i . Cet évènement est soit le nombre de décharges soit la charge moyenne par phase. μ est la valeur moyenne de la distribution, $P(x_i)$ est la probabilité de l'évènement x_i et σ est l'écart-type de la distribution.

Ces coefficients sont calculés uniquement sur des intervalles de phase $\delta\phi_+$ et $\delta\phi_-$ sur lesquels existent effectivement des décharges et non sur toute la 1/2 période. Sur les figures 8a et 8b, nous donnons les valeurs de ces coefficients et les intervalles de phase sur lesquels ils ont été calculés.

Pour chercher s'il existe une relation entre la distribution des décharges positives et négatives, nous calculons le coefficient de corrélation linéaire C_c des distributions $n(\phi)$ et $q(\phi)$. Par exemple, le coefficient de corrélation entre les distributions $n_+(\phi)$ et $n_-(\phi)$ est :

$$C_c = \text{covariance}(n_+, n_-) / \sigma_{n_+} \sigma_{n_-} = \Sigma n_{i+} n_{i-} / [(\Sigma(n_{i+})^2 \Sigma(n_{i-})^2)^{1/2}]$$

Ce coefficient est calculé pour un même intervalle égal au plus grand parmi $\delta\phi_+$ et $\delta\phi_-$ (figure 8a et 8b). Dans cet exemple, C_c de $n(\phi) = 0,78$ et C_c de $q(\phi) = 0,34$.

II. 2.2: Evolution des décharges dans le temps:

Cette procédure permet la représentation de l'évolution des grandeurs mesurées (n , q) et des valeurs déduites (ϕ_i , V_i) dans le temps.

a) $(n/\text{cycle})=f(n^\circ \text{ de cycle})$ et $(q/\text{cycle})=f(n^\circ \text{ de cycle})$: c'est la représentation du nombre et de la charge apparente totale par cycle en fonction du numéro de cycle (temps). Sur la figure 11a et 11b, il y a eu au maximum 6 décharges par cycle et la charge totale par cycle atteint 6 pC.

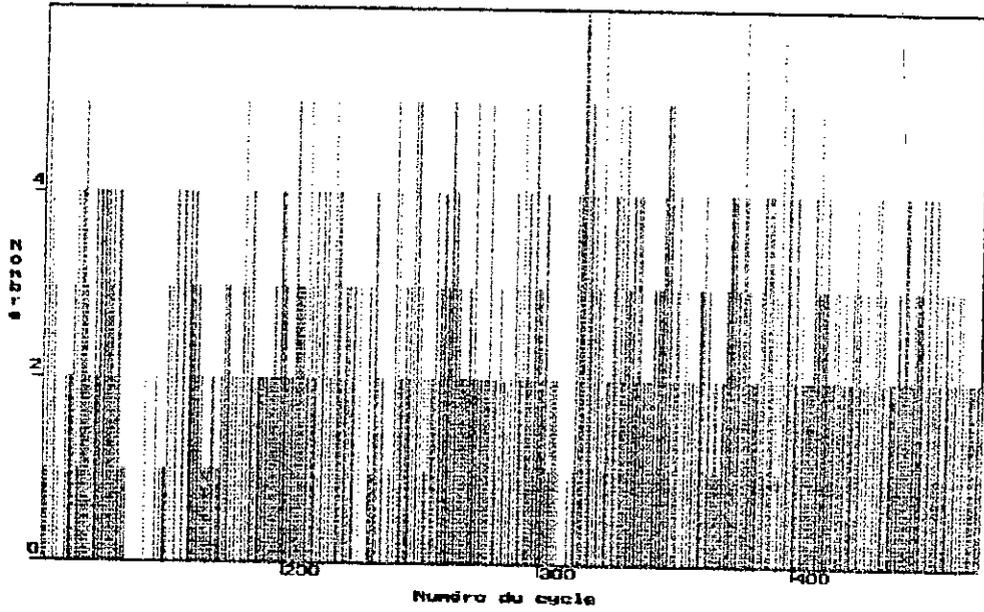
b) $(\delta\phi_+, \delta\phi_-)=f(n^\circ \text{ de cycle})$ est la variation du temps entre deux décharges successives de même signe en fonction du numéro de cycle.

c) $(V_{i+}, V_{i-})=f(n^\circ \text{ de cycle})$: C'est la variation de la tension d'apparition des décharges positives et négatives dans le temps.

d) Le tracé de l'évolution du rapport des phases ϕ_i d'apparition des premières décharges positives et négatives (ϕ_{i-}/ϕ_{i+}) dans un même cycle peut nous renseigner sur la symétrie du phénomène (figure 12).

e) $q=f(\phi, n^\circ \text{ de cycle})$: C'est l'évolution dans le temps de la distribution de la charge apparente par cycle (figure 13).

Numéro d'expérience : 2627 Numéro de la série : 1



Numéro d'expérience : 2627 Numéro de la série : 1

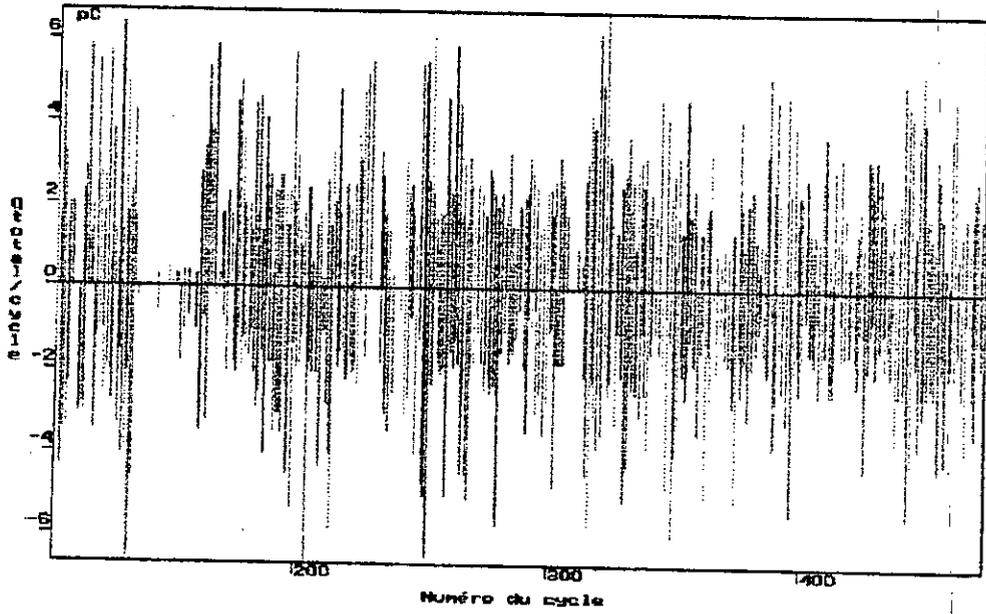


Figure 11: Variation du nombre de décharges (a) et de la charge totale (b) par cycle.

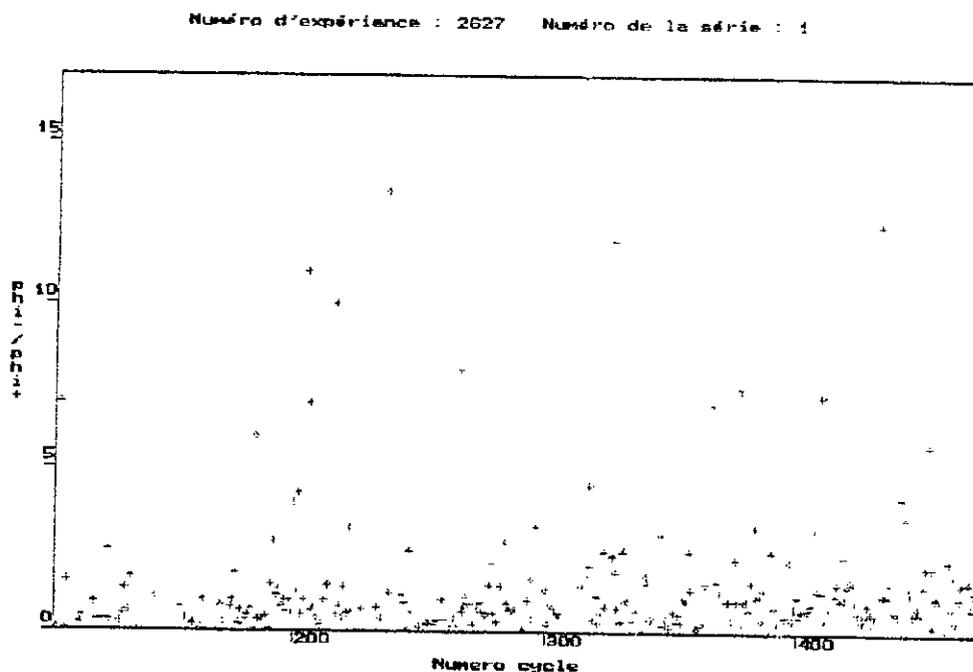


Figure 12: Variation du rapport des phases d'apparition des décharges positives et négatives en fonction du temps (n° de cycle).

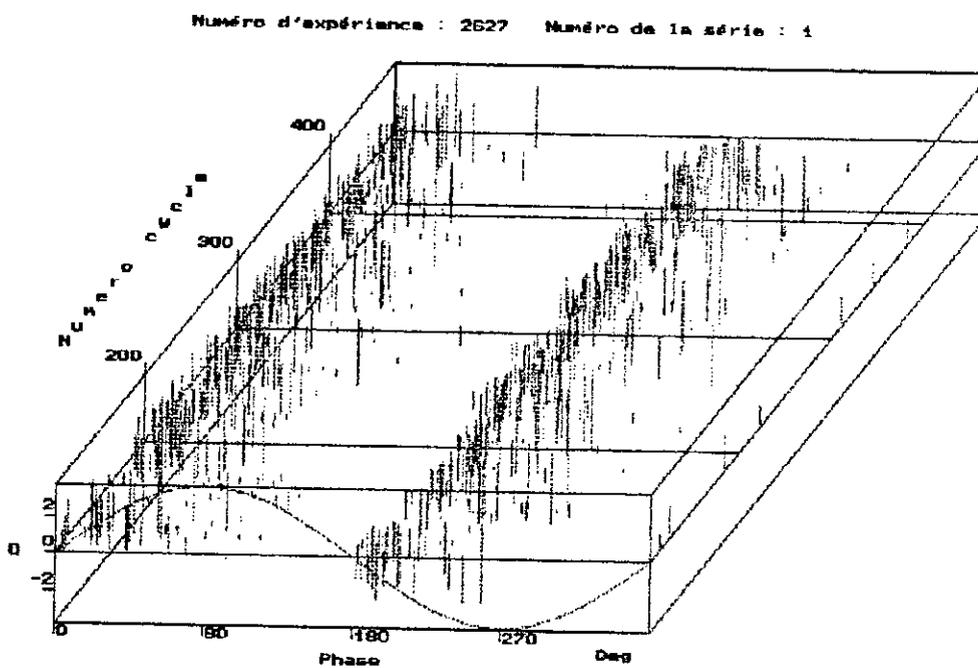


Figure 13: Evolution dans le temps (n° de cycle) de la distribution de la charge apparente par cycle.

II.2.3: Graphes en 3D sur plusieurs séries:

Nous distinguons deux types de représentation: à tension constante et à tension variable.

a) A différentes tensions: Des séries de décharges mesurées à différentes tensions V , peuvent être représentées par la variation du nombre de décharges par phase et par tension [$n=f(\phi, V)$] comme le montre l'exemple de la figure 14a, ou par la variation de la charge apparente moyenne par phase et par tension [$q=f(\phi, V)$] (figure 14b). Dans cet exemple, la tension varie de 1,6 kV à 2,6 kV avec un pas de 200 V.

b) A tension constante: Différentes séries mesurées pour une même tension, sont représentées par la variation de la charge moyenne par phase et par série [$n=f(\phi, n^{\circ}\text{série})$] (figure 15a) ou par la variation de la charge apparente moyenne par phase et par série [$q=f(\phi, n^{\circ}\text{série})$] (figure 15b).

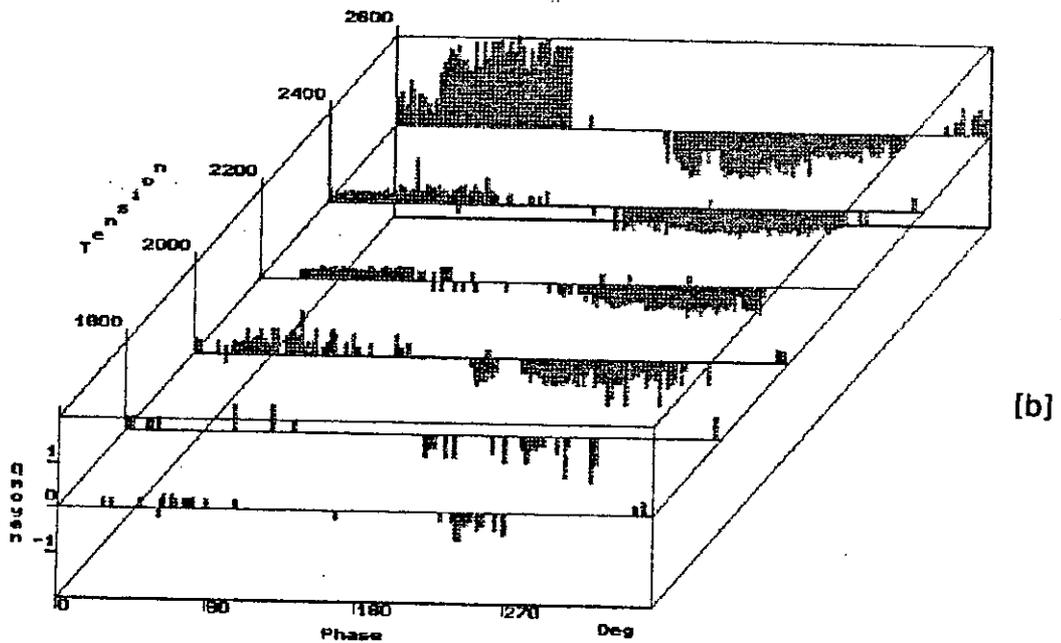
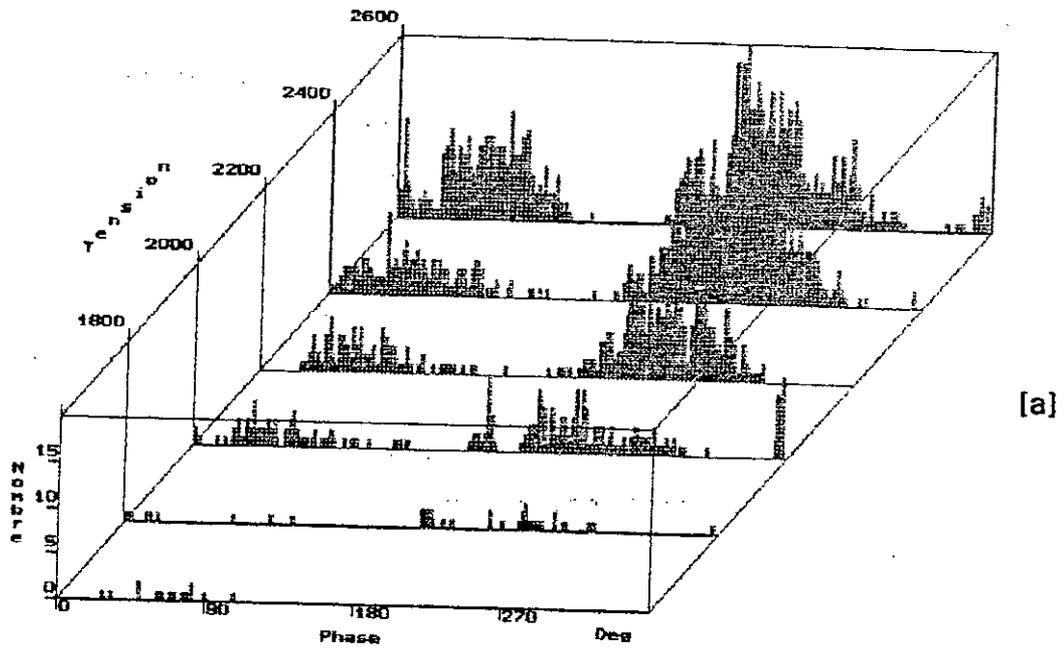


Figure 14: Représentation en 3D du nombre de décharges (a) et de la charge apparente (b) en fonction de la phase et de la tension appliquée.

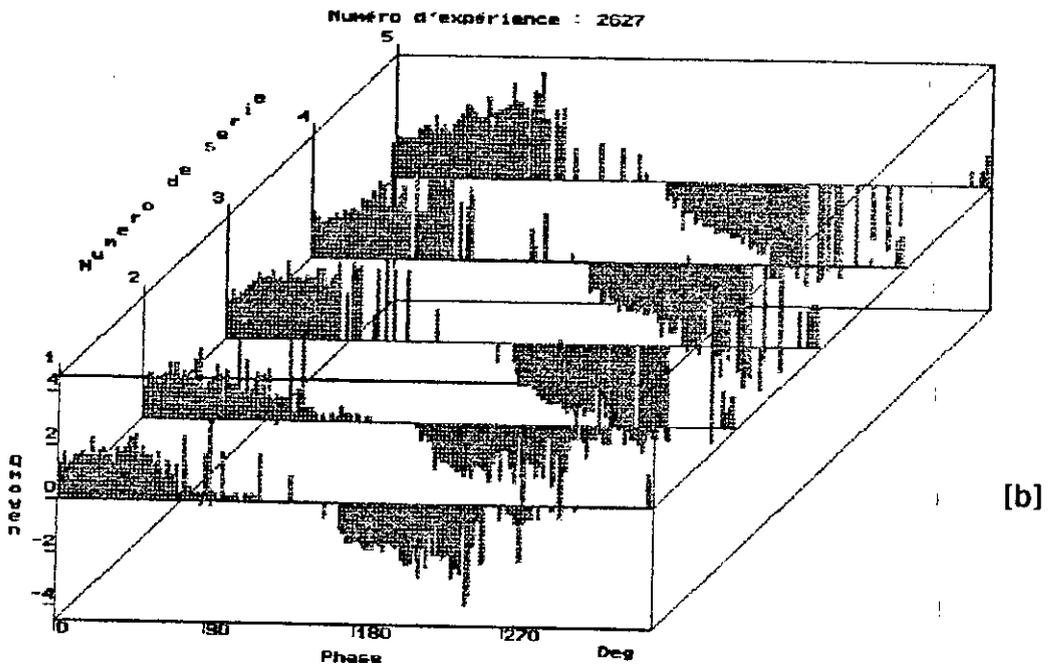
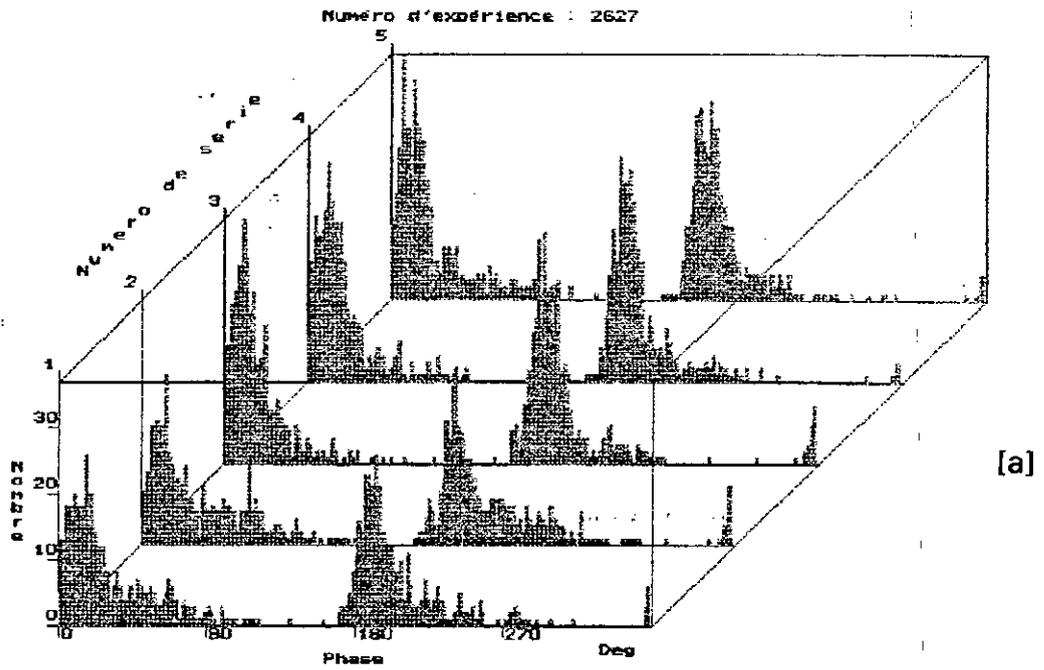


Figure 15: Représentation en 3D du nombre de décharges (a) et de la charge apparente (b) en fonction de la phase et du temps (n° de cycle).

Discussion et conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons exposé la technique de détection et d'analyse des décharges que nous avons utilisée dans le présent travail. Nous faisons les remarques suivantes:

La résolution du système de détection à 320 μs limite son utilisation à des niveaux de tension voisins de la tension d'apparition des décharges. La non-linéarité sur la charge mesurée fait que pour des décharges de faible amplitude (0,2 à 0,5 pC), l'erreur peut atteindre 100%.

Les représentations $n(\phi)$ et $q(\phi)$ et leurs paramètres statistiques permettent de comparer les décharges dans différentes configurations et nous les utiliserons dans le modèle d'identification des sources de décharges (chapitre 4, deuxième partie). Les représentations en 3D permettent de suivre l'évolution des grandeurs caractéristiques des décharges soit en fonction de la tension, soit en fonction du temps.

Au niveau du traitement des décharges, le coefficient de corrélation C_c doit être employé avec beaucoup de réserves, puisqu'il peut signifier qu'il existe uniquement une liaison corrélative qui concerne des nombres (n ou q) et non une relation de cause à effet. C'est le cas par exemple d'existence simultanée de plusieurs sites de décharges ou des décharges de bruit de fond. Un faible coefficient de corrélation C_c ne signifie pas une absence de relation entre les distributions, mais cette relation peut être non linéaire.

Les probabilités sur l'amplitude des décharges et sur leurs phases d'apparition sont des probabilités inconditionnelles. Elles ne tiennent pas compte de l'influence d'une décharge dans un cycle sur la décharge qui apparaît dans le cycle suivant [3]. Il est donc intéressant de compléter l'analyse par un calcul de probabilités conditionnelles ce qui peut nous renseigner sur l'évolution des propriétés de l'isolation. Nous disposons de tous les éléments nécessaires pour ce traitement qui est en cours d'élaboration.

Bibliographie:

- [1] P. Rain, C. Boisdon, O. Lesaint and R. Tobazeon
Behavior of streamers under divergent ac fields in transformer oils at large gaps.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. 26, N° 4, p. 715-725, august 1991.

- [2] E. Gulski, P.H.F. Morshuis and F.H. Kreuger
Automatized recognition of partial discharges in cavities.
Jap. J. of Appl. Phys. vol. 29, nb7, july 1990., p. 1329-1335.

- [3] R. J. Van Brunt
Stochastic properties of partial discharge phenomena.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. 26, N° 5; p. 902-948, october 1991.

DEUXIEME PARTIE

***DECHARGES DANS DIFFERENTES
STRUCTURES D'ISOLATION***

CHAPITRE 1

**DECHARGES DANS DES MODELES DE
CONDENSATEUR PLAN**

Introduction:

Les récents travaux effectués au L.E.M.D. sur les condensateurs tout-film [1,2] ont permis de mettre au point un protocole de vieillissement accéléré de ces condensateurs sans modifier les phénomènes physiques au cours de ce vieillissement. Les condensateurs sont soumis à une tension de 4,1 kVeff (ce qui correspond à un champ électrique de $135 \text{ Veff}/\mu\text{m}$) à 80°C sous une pression de 1,5 bars d'O₂. La durée de vie de certains condensateurs peut être abaissée à moins de 24 heures.

Il a été montré qu'au cours de ce vieillissement, il apparaît des points à faible tension de claquage localisés dans la partie du film située entre les deux électrodes (zone sous champ). Le mécanisme de création de ces points faibles peut prendre place dans le liquide et générer des espèces responsables du vieillissement du condensateur. Ce mécanisme peut être de nature électrochimique et lié au passage du courant (réactions d'oxydo-réduction). Une autre possibilité est que la dégradation du PP et donc le claquage des condensateurs soient dûs à des décharges dans le liquide dans des régions de champ électrique renforcé. On exclut le cas de décharges dans une phase gazeuse préexistante, cas qui correspondrait à des systèmes non ou mal imprégnés.

Ce sont ces hypothèses que nous avons voulu vérifier. Aussi, nous abordons l'étude expérimentale des décharges avec les buts suivants:

1. Déterminer la tension seuil d'apparition des décharges dans nos modèles de condensateurs. Nous avons choisi une méthode combinée (électrique et optique) et nous discuterons la valeur de la tension seuil obtenue. Nous étudions aussi l'influence de l'épaisseur du diélectrique, de la température et de la pression sur la tension seuil.

2. Mesurer les grandeurs caractéristiques des décharges et leur variation avec la tension appliquée. Pour caractériser la nocivité des décharges sur l'isolation, la charge apparente est la grandeur la plus couramment utilisée [3] mais la fréquence d'apparition des décharges présente aussi un grand intérêt puisque des décharges de faible amplitude et de fréquence élevée peuvent avoir des conséquences graves sur la tenue de l'isolation [4].

3. Localiser les décharges ce qui permet de comprendre les mécanismes pouvant être à l'origine de ces décharges.

4. Examiner l'effet de la nature de l'imprégnant sur les décharges (seuil d'apparition, fréquence, charge apparente, distribution dans la période).

5. Chercher aussi à vérifier si la dégradation du condensateur et la diminution de sa rigidité diélectrique sont liées ou non à l'apparition des décharges.

I: EXPERIMENTATION

I.1: Modèle de Condensateur:

Le condensateur d'étude (figure 1) est constitué d'un corps en téflon contenant deux électrodes planes et parallèles entre lesquelles nous plaçons deux films de polypropylène imprégné soumis à une pression de l'ordre de 2 bars. Les électrodes sont réalisées en duralumin de diamètre 10 et 40 mm respectivement et polies soigneusement. La capacité du condensateur imprégné ainsi réalisé est voisine de 50 pF. Pour contrôler la qualité de l'imprégnation, on vérifie à l'aide d'une méthode qualitative (méthode acoustique) que le condensateur ne présente pas de décharges aux basses tensions ce qui témoignerait de la présence de bulles d'air et d'une mauvaise imprégnation.

Comme liquide d'imprégnation nous avons utilisé un mélange de mono et di-benzyltoluène (M/DBT) commercialisé par Prodelec sous le nom de Jarylec C100 que nous purifions préalablement par brassage avec une terre rare (atapulgit) et filtration sur filtre en cellulose de porosité 0,2 μm [5]. Nous comparons ce liquide aromatique avec un hydrocarbure saturé, le n-Décane, de pureté > 99,3%.

Les films de polypropylène isotactique (95%), rugueux sur les deux faces sont commercialisés par Bollore Technologies. L'épaisseur pondérale du film est de 13,6 μm . L'épaisseur moyenne mesurée sur 10 couches avec une pression de 1 atm est 15 μm .

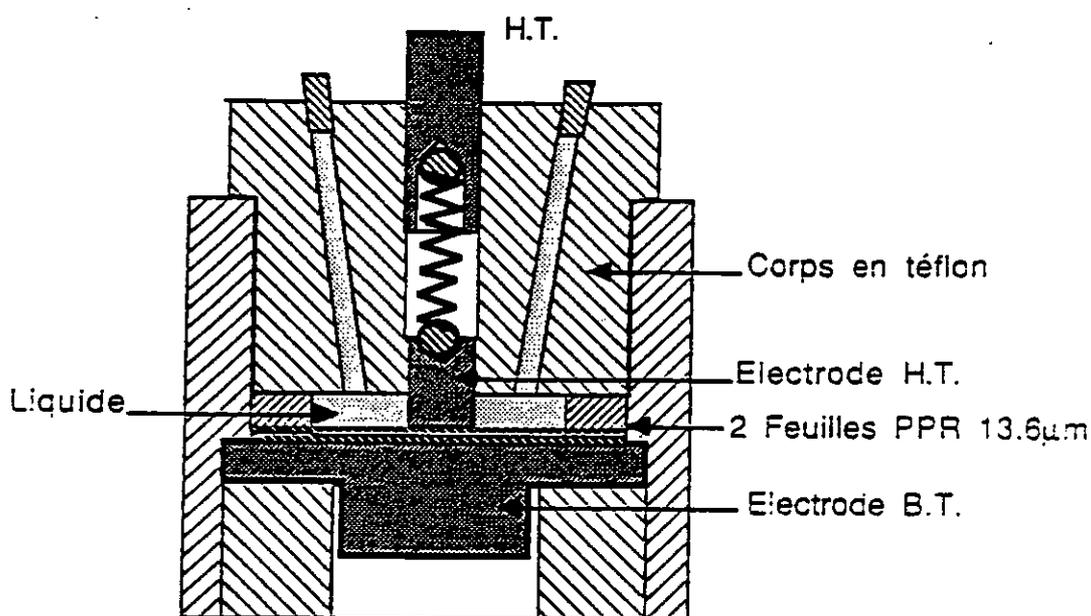


figure 1: Schéma du modèle de condensateur plan

1.2: Détection des décharges:

En utilisant le montage de détection des décharges décrit au chapitre II de la 1ère partie de cette étude, nous appliquons au condensateur d'étude une tension croissante par paliers jusqu'à une valeur supérieure au niveau d'apparition des décharges mais inférieure à la tension de claquage. Pour chaque valeur de tension nous procédons à une acquisition des décharges pendant un temps que nous fixons suivant la fréquence des décharges à au moins 5mn.

A titre d'exemple, nous donnons sur les figures 2a et 2b la représentation des décharges fournies par le logiciel que nous avons mis au point. Elles correspondent à une acquisition de 5 mn avec un modèle de condensateur imprégné au n-décane, la tension est de 4,8 kVeff.

La figure 2a donne le nombre de décharges s'étant produites dans une position donnée dans le cycle, celui-ci étant divisé en 250 intervalles. Pendant l'alternance positive, dans une seule position il y a eu au maximum 2 décharges. Le nombre de décharges par position est normalisé par rapport à ce chiffre. 7 autres décharges se sont produites en différents endroits de l'alternance. La fréquence moyenne des impulsions positives est donc de $0,03 \text{ s}^{-1}$. Pendant l'alternance négative, le nombre max de décharges pour une position donnée est de 22. Ce nombre est atteint pour une tension proche de la tension max. Le nombre de décharges négatives par position est rapporté à ce nombre. La fréquence moyenne des décharges négatives est de $0,1 \text{ s}^{-1}$. Le calcul de la fréquence moyenne des décharges suppose que le régime de décharges est continu dans le temps. Sinon, elle doit être évaluée sur les intervalles de temps où les décharges se produisent de manière régulière.

Sur la figure 2b est représentée la charge moyenne par position, normalisée à la charge maximum positive ou négative qui dans cet essai est respectivement de +10 pC et -1,9 pC. Cette charge moyenne est la moyenne arithmétique de la charge des décharges se produisant dans une position donnée. On constate que les décharges négatives ont une valeur apparente moyenne de 0,5 pC, pratiquement indépendante de la tension instantanée.

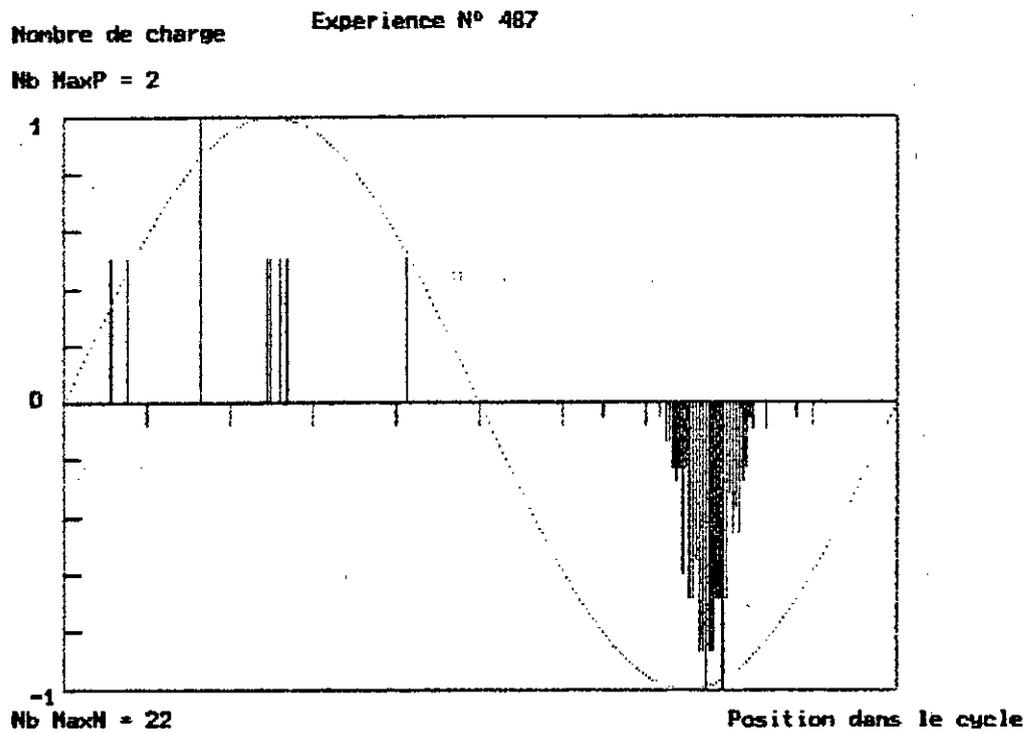


figure 2a: Distribution du nombre de décharges dans le cycle.
Condensateur au PP imprégné de n-décane ; $V_{eff} = 4,8$ kV.

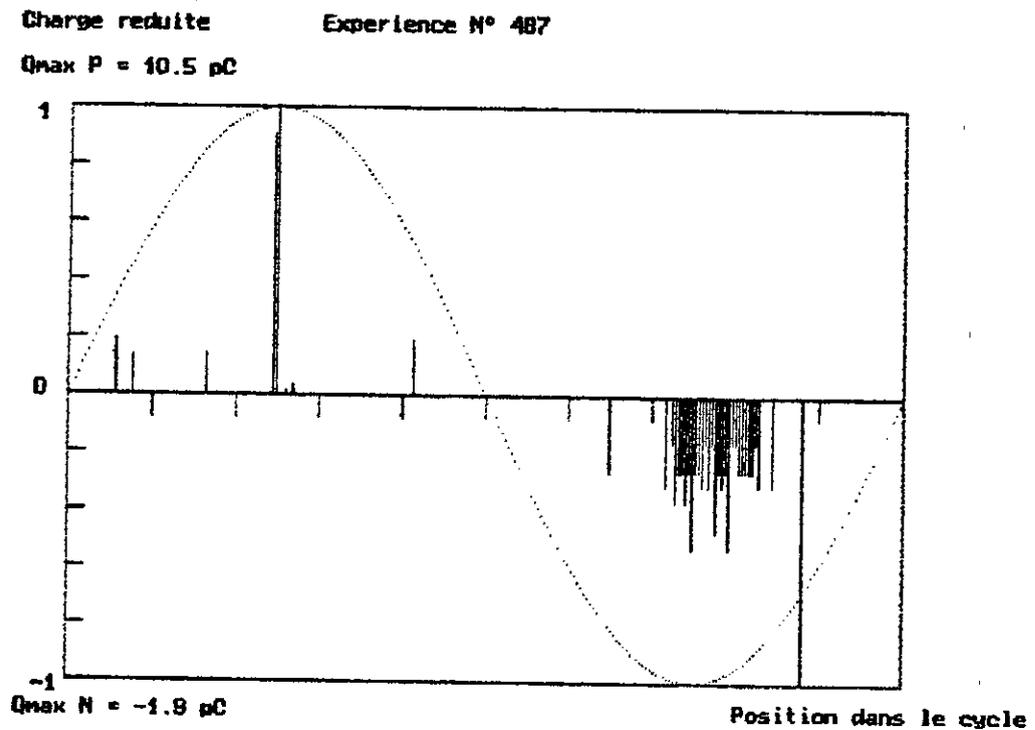


figure 2b: Distribution de la charge apparente moyenne dans le cycle.
Condensateur au PP imprégné de n-décane ; $V_{eff} = 4,8$ kV.

II: RESULTATS EXPERIMENTAUX

II.1: Tension d'apparition des décharges:

La détermination du seuil d'apparition des décharges dans la configuration que nous avons choisie (géométrie plane et parallèle) est difficile puisque souvent on passe d'un état dit de bruit de fond à un état avancé de décharges. L'état de bruit de fond est caractérisé par des décharges réparties de manière aléatoire dans le cycle, leur charge apparente est inférieure à 1 pC et leur fréquence est inférieure à $0,02 \text{ s}^{-1}$ avec autant de décharges positives que négatives. Suivant les conditions expérimentales, cette fréquence peut atteindre $0,1 \text{ s}^{-1}$.

La différence entre l'état de bruit de fond et l'état avec décharges s'observe de façon qualitative sur la répartition dans le cycle des impulsions mesurées : à 4,8 kV les décharges sont concentrées vers le maximum de la tension. De manière quantitative, la fréquence des impulsions passe de $0,02 \text{ s}^{-1}$ à environ $0,1 \text{ s}^{-1}$, la charge apparente maximale des impulsions négatives de 0,7 à 1,9 pC. Par contre, la charge apparente moyenne de ces mêmes impulsions reste pratiquement inchangée à environ 0,5 pC. Les figures 3a et 3b correspondent à un essai à 5,2 kV et une durée d'acquisition de 5 mn. Des décharges négatives se produisent maintenant avant le maximum de la tension, et surtout des décharges positives sont détectées avant même le passage par zéro de la tension. Ces décharges sont probablement dues au dépôt de charges négatives sur le film de PP, créant un champ électrique se superposant au champ électrique dû à la tension appliquée. Ce phénomène est bien connu quand les décharges se produisent dans des cavités gazeuses [6].

Pour déterminer le seuil d'apparition des décharges, nous avons utilisé comme grandeur caractéristique des décharges, leur fréquence moyenne, leur charge apparente maximale et l'intensité moyenne de lumière émise [7]. Celle-ci est mesurée à l'aide d'un photomultiplicateur en remplaçant l'une des électrodes métalliques par un verre rendu conducteur par un dépôt d'oxyde d'indium (chapitre I, partie I). Sur la figure 4, nous avons tracé en fonction de la tension la variation de la fréquence moyenne d'apparition des décharges (courbe a) et de la valeur maximale de la charge apparente (courbe b) dans un condensateur au PP imprégné de n-décane. Le changement de pente de ces courbes correspond à des tensions au-dessus desquelles apparaissent des décharges avec une fréquence moyenne supérieure à $0,1 \text{ s}^{-1}$ et une amplitude supérieure à 1 pC. C'est cette tension que nous appellerons tension seuil (V_a). Dans l'exemple de la figure 4, cette tension est égale à 4,5 kVeff. Pour différents types de condensateurs au n-décane, cette tension

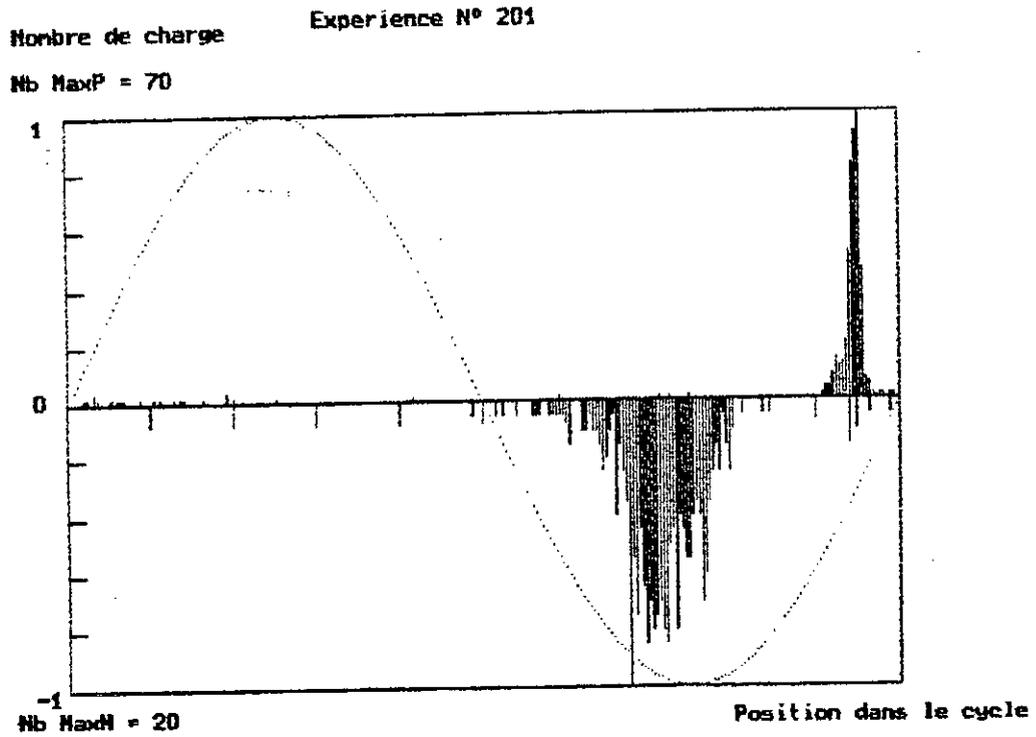


figure 3a: Distribution du nombre de décharges dans le cycle.
Condensateur au PP imprégné de n-décane; $V_{eff} = 5,2$ kV.

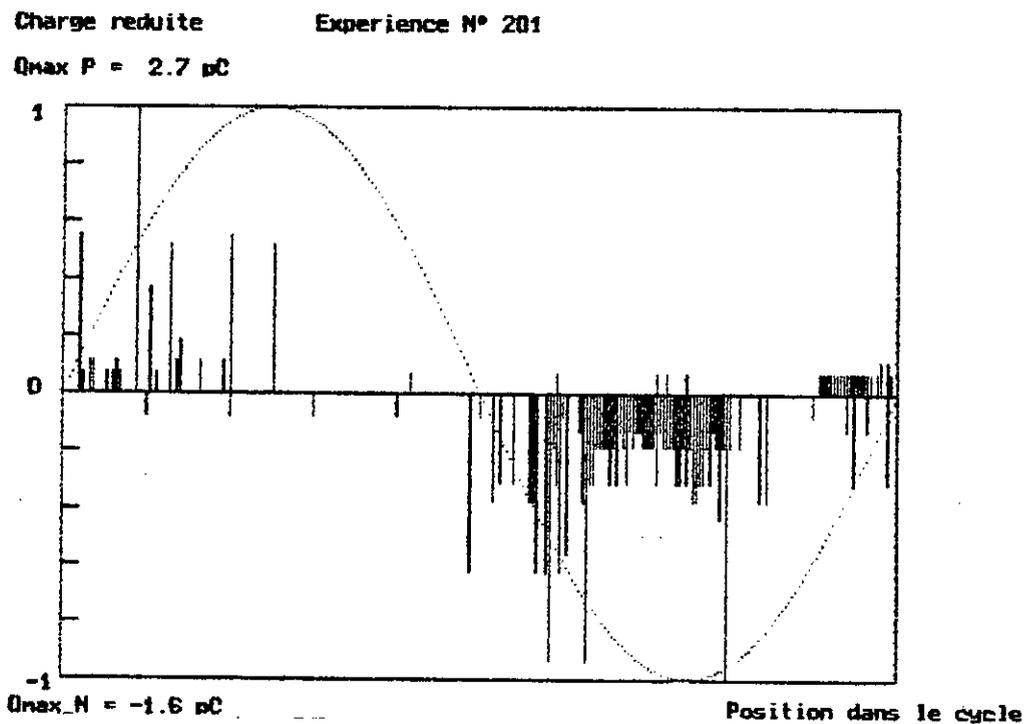


figure 3b: Distribution de la charge apparente moyenne dans le cycle.
Condensateur au PP imprégné de n-décane ; $V_{eff} = 5,2$ kV.

est comprise entre 4,4 et 4,8 kVeff. Cette dispersion des résultats pour le même type de condensateur est due à la technique de fabrication des condensateurs (pression exercée sur le film, arrondi des électrodes légèrement différent d'un essai à un autre) et cette dispersion est du même ordre de grandeur que l'écart du aux incertitudes de la méthode de détermination du seuil. Elle provient aussi du fait que pour des tensions proches de la tension seuil (~5%) les décharges peuvent ou non se produire sur de longs intervalles de temps [8].

II.1.a: Influence de l'épaisseur du diélectrique:

Nous avons étudié la variation de la tension seuil en fonction du nombre de film de PP d'épaisseur 13,6 μm dans les modèles de condensateurs imprégnés au n-décane. La tension seuil a été déterminée à partir de la fréquence des décharges. Sur le tableau1, nous donnons les valeurs des tensions seuil à différentes épaisseurs.

Tableau1

d [μm]	13,6	27,2	40,8	54,4
Veff [kV]	2,7 - 3	4,4 - 4,8	5 - 5,3	7 - 7,2

La tension seuil varie suivant une loi de type $V_a = kd^{1/2}$ où d est l'épaisseur du diélectrique et k une constante.

II.1.b: Influence de la température:

La variation de la température entre 20 et 80°C ne modifie pas sensiblement la tension d'apparition des décharges dans ces modèles de condensateurs. Des travaux antérieurs sur des condensateurs au papier [9] ou au polypropylène imprégné [10] ont montré des résultats similaires.

II.2: Comparaison liquide aliphatique / liquide aromatique:

Nous comparons les résultats obtenus précédemment sur les modèles de condensateurs au n-décane (hydrocarbure saturé) (figure 4) avec ceux obtenus sur des modèles de condensateurs au PP imprégné de M/DBT. Nous distinguons alors deux types de modèles de condensateurs : Type 1 au n-décane et Type 2 au M/DBT. Le Tableau 2 rappelle les principales grandeurs physiques des deux liquides.

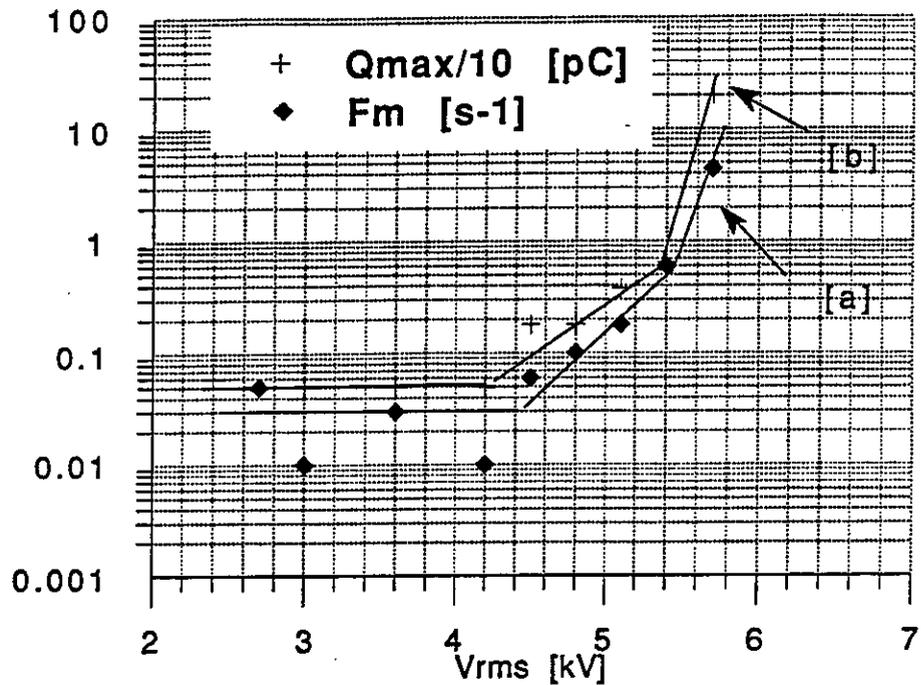


figure 4: Variation de la fréquence d'apparition des décharges (courbe a) et de l'amplitude de la charge apparente (courbe b) en fonction de la tension. Condensateur au PP imprégné de n-décane.

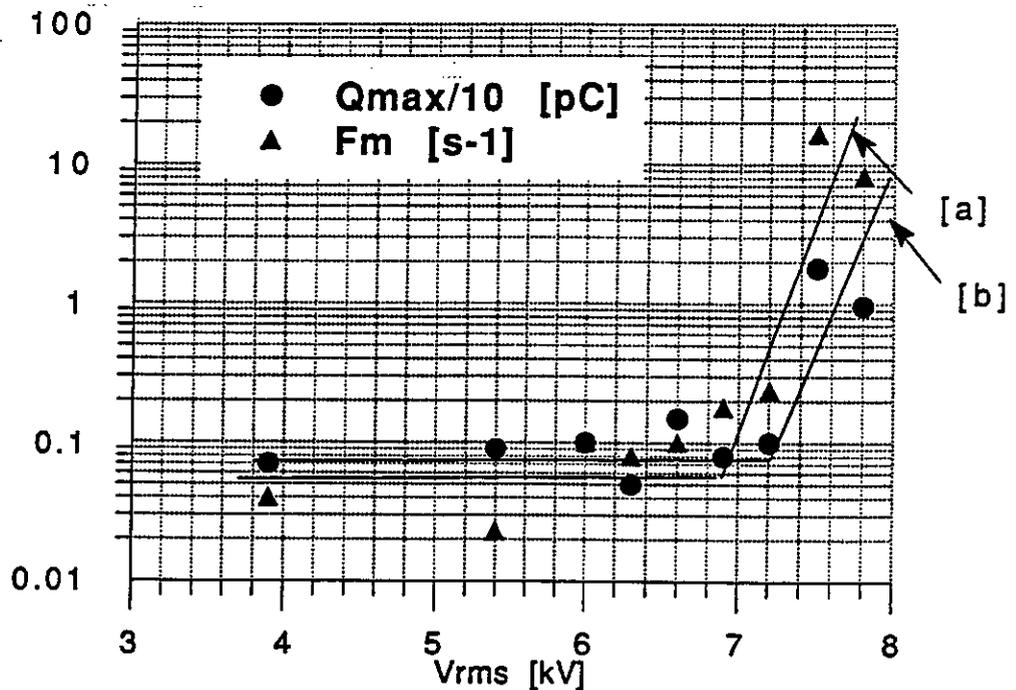


figure 5: Variation de la fréquence d'apparition des décharges (courbe a) et de l'amplitude de la charge apparente (courbe b) en fonction de la tension. Condensateur au PP imprégné de M/DBT.

Tableau 2

	permittivité relative à 20°C	viscosité à 20°C [cSt]	résistivité [Ωm]
n-décane	1,99	0,92	10 ¹³
M/DBT	2,65	6,3	2.10 ¹²

Nous étudions l'influence de ces deux liquides sur la tension d'apparition des décharges, les grandeurs caractéristiques des décharges et leur forme dans ces modèles de condensateurs. Nous examinons ensuite l'influence de la pression et de certains additifs sur les décharges.

II.2.a: sur la tension V_a :

Les essais effectués sur une dizaine d'échantillons donnent pour la tension seuil de détection des décharges dans les condensateurs de type 2 les valeurs de 7 à 7,5 kV_{eff}. Cette tension est seulement de 4,5 à 4,8 kV_{eff} pour les condensateurs de type 1.

Les particularités du liquide aromatique s'observent sur la figure 5. Nous y avons tracé la variation de la fréquence moyenne des décharges (courbe a) et de l'amplitude de la charge apparente (courbe b) en fonction de la tension efficace appliquée à un condensateur de type 2.

Les condensateurs de type 1 présentent un niveau de décharge plus élevé (en amplitude et en fréquence) que ceux de type 2 pour une même surtension au-dessus du seuil. A titre d'exemple dans le tableau 3, nous donnons les caractéristiques des décharges dans les deux cas pour une surtension de 10% au-dessus de leur seuil respectif.

Tableau 3

	V _{eff} [kV]	F [s ⁻¹]	Q _{moy} [pC]	Q _{max} [pC]
type 1	5,1	3,7	3,85	200
type 2	7,8	0,6	0,33	1,2

On note que l'amplitude de la charge apparente dans les condensateurs de type 1 peut dépasser 200 pC pour une tension de 5,1 kV, alors que dans les types 2, elle n'atteint que 4,6 pC à 8 kV (figures 4 et 5).

Sur la figure 6, nous avons tracé la variation de l'intensité de lumière émise en fonction de la tension pour les deux types de condensateurs. Le niveau d'intensité de lumière émise dans le cas des condensateurs au M/DBT est plus élevé que celui des condensateurs au n-décane, ce qui masque la contribution des décharges à la lumière moyenne émise. La forte intensité lumineuse dans les condensateurs type 2 est attribuée à l'aromaticité du M/DBT [5].

Au niveau des observations qualitatives, on note aussi bien dans les condensateurs de type 1 que ceux de type 2 que la distribution des décharges dans le cycle dépend de la valeur de la tension appliquée: Pour $V \geq V_a$, on a une correspondance entre le signe des décharges et celui de la tension appliquée (figure 2a et 2b); et pour $V \gg V_a$, il apparaît des décharges positives avant le renversement de la tension (figures 4a et 4b). Dans les condensateurs de type 1 le seuil correspond à l'apparition de décharges essentiellement négatives. Les décharges positives n'apparaissent qu'à des tensions bien supérieures à la tension seuil. Dans les condensateurs de type 2, il y a pratiquement autant de décharges positives que négatives, pour une tension proche de la tension seuil.

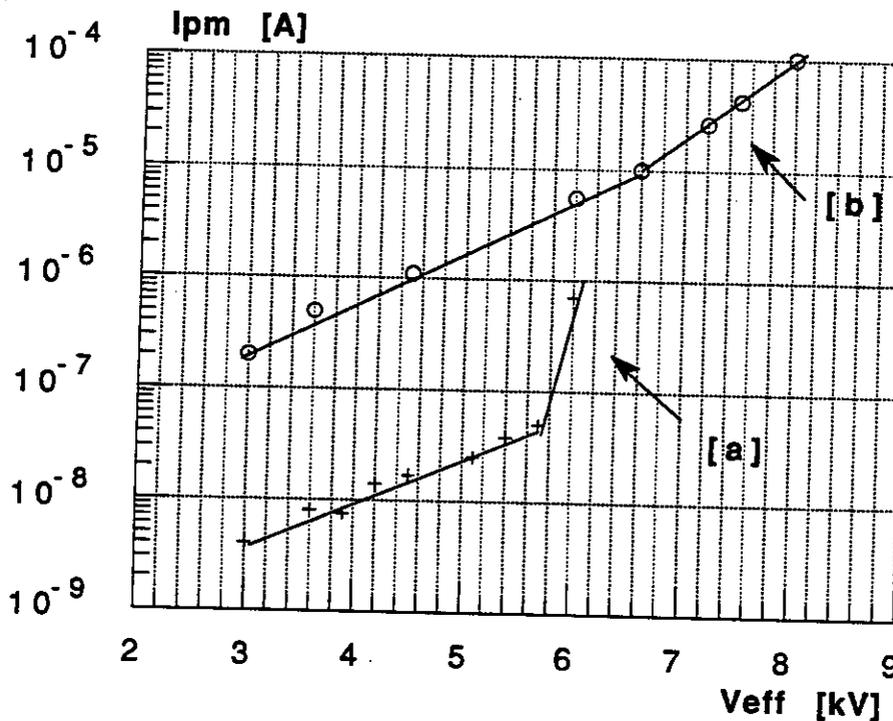


figure 6: Variation de l'intensité de lumière émise en fonction de la tension.
 Condensateur type 1 (courbe a)
 Condensateur type 2 (courbe b).

II.2.b: Sur la forme et la localisation des décharges :

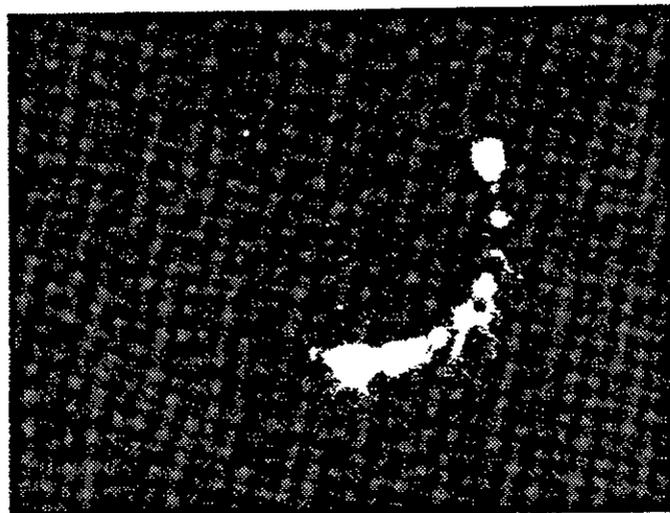
De grosses différences entre les deux liquides apparaissent quand on étudie la localisation et la forme des décharges à partir de la lumière qu'elles émettent. En remplaçant l'électrode métallique de grand diamètre (figure 1) par une électrode en verre recouvert d'oxyde d'indium et en utilisant un intensificateur d'image équipé d'une caméra vidéo (chapitre II de la première partie), on peut visualiser les décharges se produisant à différentes tensions dans les deux types de condensateur.

On remarque que pour des tensions faibles par rapport au seuil (facteur 1/2), on observe des points lumineux, situés essentiellement sur le pourtour de l'électrode, mais aussi au centre de l'électrode (type2). Leur nombre et la lumière émise augmentent quand la tension croît. Compte tenu du faible champ électrique et de la non-détection de décharges, nous attribuons l'émission de lumière à des radicaux dûs au passage du courant dans l'oxyde d'indium et le liquide.

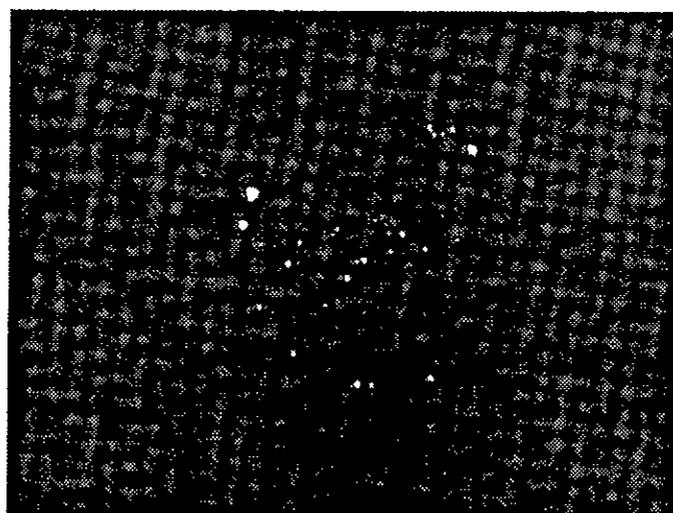
Pour des tensions supérieures aux tensions seuil, dans les condensateurs au n-décane, nous observons des décharges qui partent du bord de l'électrode et qui se propagent à la surface du film de PP. Elles ont un aspect filamentaire analogue à celui des décharges rampantes à la surface d'un film isolant [7]. Ces décharges possèdent une amplitude ≥ 200 pC à 5,1 kV. Au fur et à mesure que la tension augmente, le nombre de sites de décharges augmente. Sur la figure 7a, nous donnons un exemple de photographie des zones de décharges à 5,1 kV. Par contre dans les condensateurs imprégnés au M/DBT les points lumineux augmentent en nombre et en intensité mais restent localisés dans la zone sous champ électrique (figure 7b à 8 kV). A cette tension, on observe un point fortement brillant en bord d'électrode mais l'amplitude des décharges reste $\leq 2,3$ pC, ce qui laisse penser qu'il y a passage d'un courant important dû à un renforcement local du champ électrique non accompagné par des décharges de grande amplitude. Des pics de lumière en absence de décharges ont déjà été observés dans les liquides diélectriques [11].

II.2.c: Influence de la pression sur les décharges:

Pour les deux types de condensateurs, on a étudié l'influence sur les décharges d'une pression d'azote sur le liquide. Cette pression est obtenue en plaçant le condensateur d'étude ouvert dans une enceinte métallique remplie d'azote. Les mesures des décharges sont effectuées à différents niveaux de tension et de pression. Sur la figure 8, on a tracé la variation de la charge apparente maximale en



[a]



[b]

figure 7: Photographies de décharges dans des condensateurs.
a) Type 1: PP + n-décane ; $V_{eff} = 5,1$ kV
b) Type 2: PP + M/DBT ; $V_{eff} = 8$ kV.

fonction de la pression pour une tension fixée ($V = 5,7 \text{ kV}_{\text{eff}}$) dans un condensateur de type 1. L'augmentation de la pression d'azote conduit à la diminution de la fréquence et de la charge moyenne des décharges. Le seuil de détection des décharges passe de 4,8 à 6 kV pour une pression de 5 bars dans les condensateurs de type 1, soit une augmentation de 25 %. Dans les condensateurs de type 2, l'influence de la pression est la même. Par exemple la tension de détection des décharges passe de 7,2 à 8,7 kV, soit une augmentation d'environ 20% quand la pression passe à 5 bars.

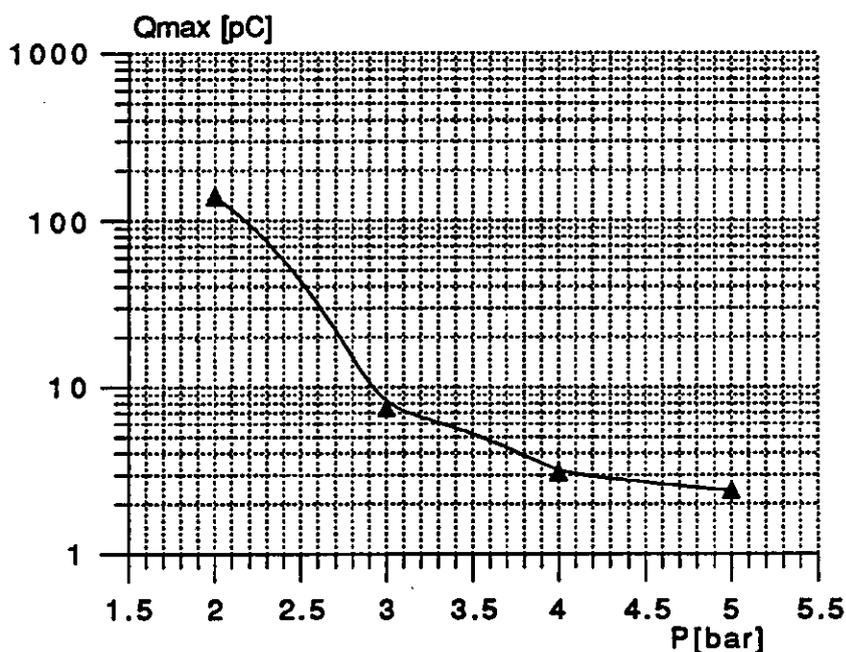


figure 8: Variation de l'amplitude de la charge apparente en fonction de la pression d'Azote.
Condensateur Type 1, $V_{\text{eff}} = 5,7 \text{ kV}$.

II.2.d: Influence de la résistivité du liquide:

Nous étudions l'influence de la résistivité du liquide imprégnant sur les décharges dans nos modèles de condensateurs vu que cette résistivité diminue au cours des essais de vieillissement. Le M/DBT contenant 10^{-4} M/l de triisoamylammonium picrate (TiaPi) possède une résistivité égale à $7 \cdot 10^8 \Omega \text{m}$. Sur la figure 9, nous avons

tracé la variation de l'amplitude de la charge apparente et de la fréquence moyenne en fonction de la tension appliquée dans un modèle de condensateur imprégné de M/DBT + Ti₂Pi. La tension de détection des décharges dans ce cas est égale à 8 kV_{eff} alors qu'elle est de (7,2 à 7,5) kV dans les modèles de condensateurs imprégnés au M/DBT. Dans cette expérience nous détectons des décharges de forte amplitude à 6 kV qui disparaissent au bout de quelques minutes. Ceci est un comportement typique des isolations imprégnées [8, 12].

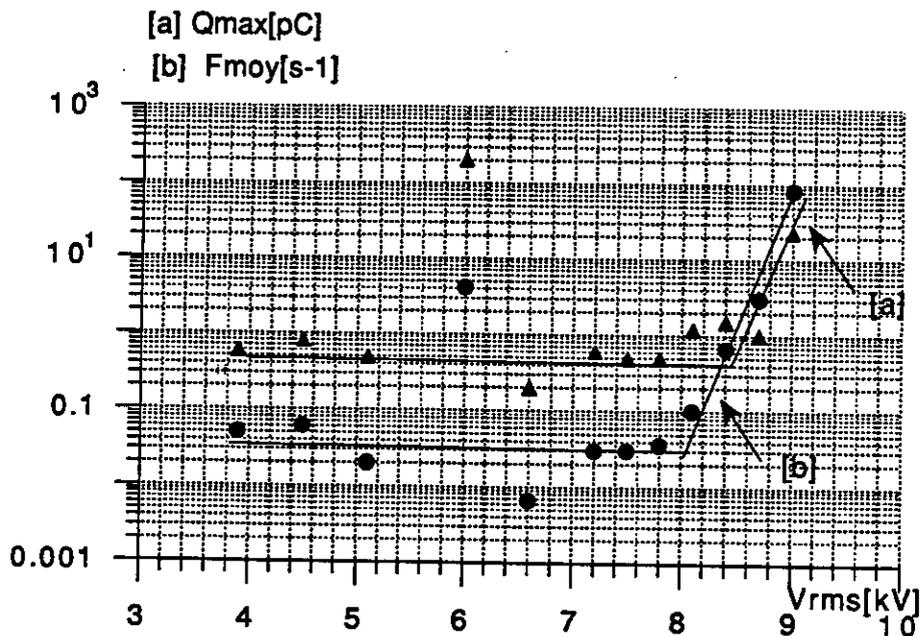


figure 9: Variation de l'amplitude de la charge apparente (courbe a) et de la fréquence moyenne des décharges en fonction de la tension ; Condensateur au PP imprégné de M/DBT + Ti₂Pi.

II.2.e: Action de l'époxyde sur les décharges:

Il a été montré [5] lors des essais de vieillissement accéléré de condensateurs en présence d'oxygène que l'addition d'époxyde au M/DBT diminue considérablement le vieillissement (dégradation de surface et rigidité diélectrique) des films de polypropylène dans la zone sous champ électrique. Nous avons procédé à la mesure des différentes grandeurs caractéristiques des décharges dans des modèles

de condensateur imprégné de M/DBT + 1% d'époxyde (DGEBA) dans les conditions décrites en II.1. De ces mesures nous tirons les conclusions suivantes:

- La tension de détection des décharges est pratiquement la même que dans les condensateurs au M/DBT (~ 7 kV);
- L'amplitude des décharges peut dépasser 100 pC pour une tension proche de V_a ;
- Les condensateurs possèdent une tension de claquage relativement faible (7,5 à 7,8 kV_{eff}) alors qu'en absence d'époxyde, ils peuvent supporter jusqu'à 9 kV quelques minutes. Le claquage des condensateurs a lieu suite à l'apparition d'une ou plusieurs décharges de grande amplitude (≥ 100 pC) et ou de fréquence très élevée (≥ 50 dech/cycle) pouvant atteindre la fréquence limite de résolution de notre système de détection. Sur la figure 10a, nous montrons un exemple de spectre dans le temps de décharges dans un condensateur au PP imprégné de M/DBT + époxyde soumis à $V = 7$ kV, où nous pouvons voir l'instant de claquage correspondant à l'apparition de décharges négatives de 100 pC et 80 pC suivies d'une décharge positive de 28 pC (échelle de temps dilatée sur la figure 10b).

Ces résultats montrent que dans nos conditions expérimentales (température ambiante, absence d'O₂, mise sous tension durant quelques minutes), l'époxyde n'améliore pas la tenue aux décharges des condensateurs. Elle semble plutôt favoriser l'apparition de décharges de grande amplitude ce qui conduit à un claquage prématuré de ces condensateurs. La propriété inhibitrice de dégradation par les époxydes n'intervient que dans le domaine des tensions $\leq V_a$. En présence de décharges ($V > V_a$), l'époxyde peut entraîner un effet inverse. L'action des décharges sur le film de PP sera examinée dans la troisième partie de cette étude.

II.3: Décharges et vieillissement des condensateurs:

Dans un précédent travail sur le vieillissement des condensateurs de type 2 dans les conditions suivantes (4,1 kV_{eff}, 80°C, 1,5 bar d'O₂), il a été montré que leur durée de vie est comprise entre 20 et 24 heures [5]. Dans le but de mieux cerner les mécanismes à l'origine de la dégradation et du claquage de ces condensateurs, on a cherché à savoir dans différentes conditions de pression et de température si les décharges apparaissent au cours du vieillissement des condensateurs. Nous considérons 3 protocoles de vieillissement:

II.3.a: Vieillissement 20°C et pression atmosphérique (Vi₁):

Le condensateur est soumis à une tension efficace de 4,1 kV durant 20 heures et nous procédons à une acquisition de décharges durant cette période. Il ne semble

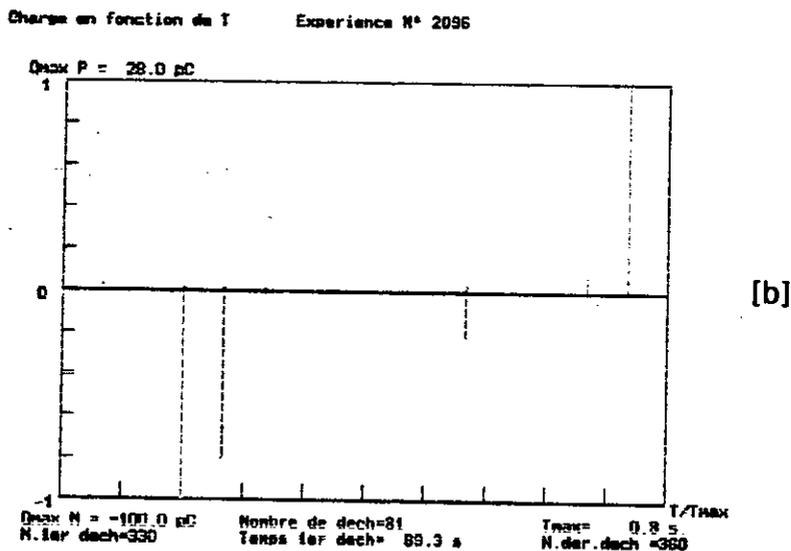
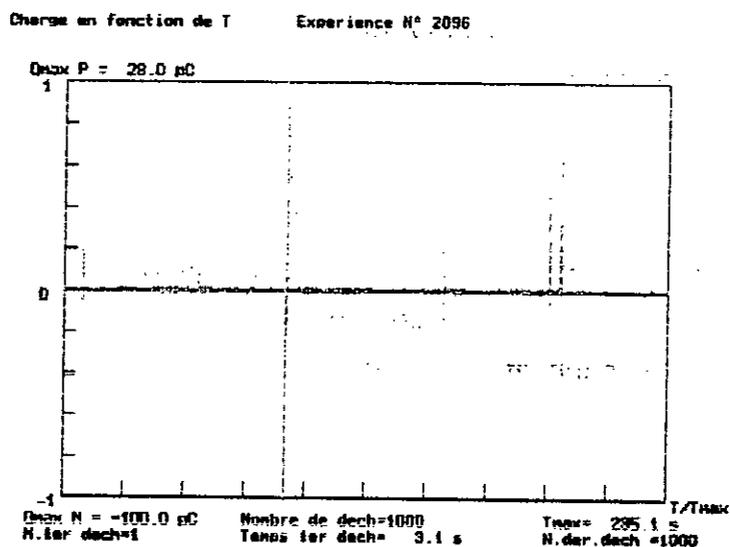


figure 10: Variation de la charge apparente en fonction du temps ;
 Condensateur au PP imprégné de M/BT +époxyde ; V = 7,5 kV;
 a) spectre de 1000 décharges;
 b) spectre dilaté des décharges n° 330 à 360.

pas qu'il y ait des décharges en plus du bruit de fond détecté (même fréquence, même Q_{max} , même Q_{moy}).

II.3.b: Vieillissement à température ambiante et 1,5 bar d'O₂ (Vi₂):

La charge apparente maximale au cours du vieillissement sous 4,1 kV_{eff} et 1,5 bar d'O₂ à 20°C reste inférieure à 1 pC et les décharges détectées correspondent au bruit de fond du système. Plusieurs essais ont montré qu'après un vieillissement pendant 20 heures dans les conditions Vi₂, les condensateurs claquent à une tension comprise entre 5 et 6 kV_{eff} sans que des décharges puissent être détectées avant le claquage, alors qu'avant vieillissement, les condensateurs supportaient 8 kV_{eff}, plusieurs minutes sans claquer.

II.3.c: Vieillissement à 80°C et 1,5 bar d'O₂ (Vi₃):

On effectue le vieillissement pendant un temps inférieur à la durée de vie moyenne du condensateur (20 heures). Les mesures de décharges à 4,1 kV et température ambiante avant et après un vieillissement de 16 heures correspondent au bruit de fond. Mais nous remarquons qu'après vieillissement, il y a un fort abaissement de la rigidité diélectrique du condensateur. Celui-ci a claqué à une tension inférieure à 6 kV_{eff} sans qu'il y ait détection de décharges avant le claquage.

II.4: Propriétés du liquide et du PP après Vi₃:

Nous avons étudié l'évolution des caractéristiques du liquide imprégnant et du film de polypropylène après vieillissement des condensateurs dans les conditions Vi₃ :

II.4.a: Propriétés du liquide:

Le M/DBT à 80°C dans une atmosphère d'O₂ (sans application de champ électrique) subit une oxydation thermique se traduisant par la formation de 2-et 4-méthylbenzophénone. Ces composés ont été identifiés par chromatographie en phase gazeuse (pic 5 et 6) dont nous représentons les chromatogrammes sur les figures 11a et 11b. Un travail est en cours au laboratoire sur l'identification des autres composés produits de l'oxydation thermique du M/DBT [13]. Cette oxydation se manifeste aussi par la diminution de la résistivité électrique du liquide d'un facteur 3.

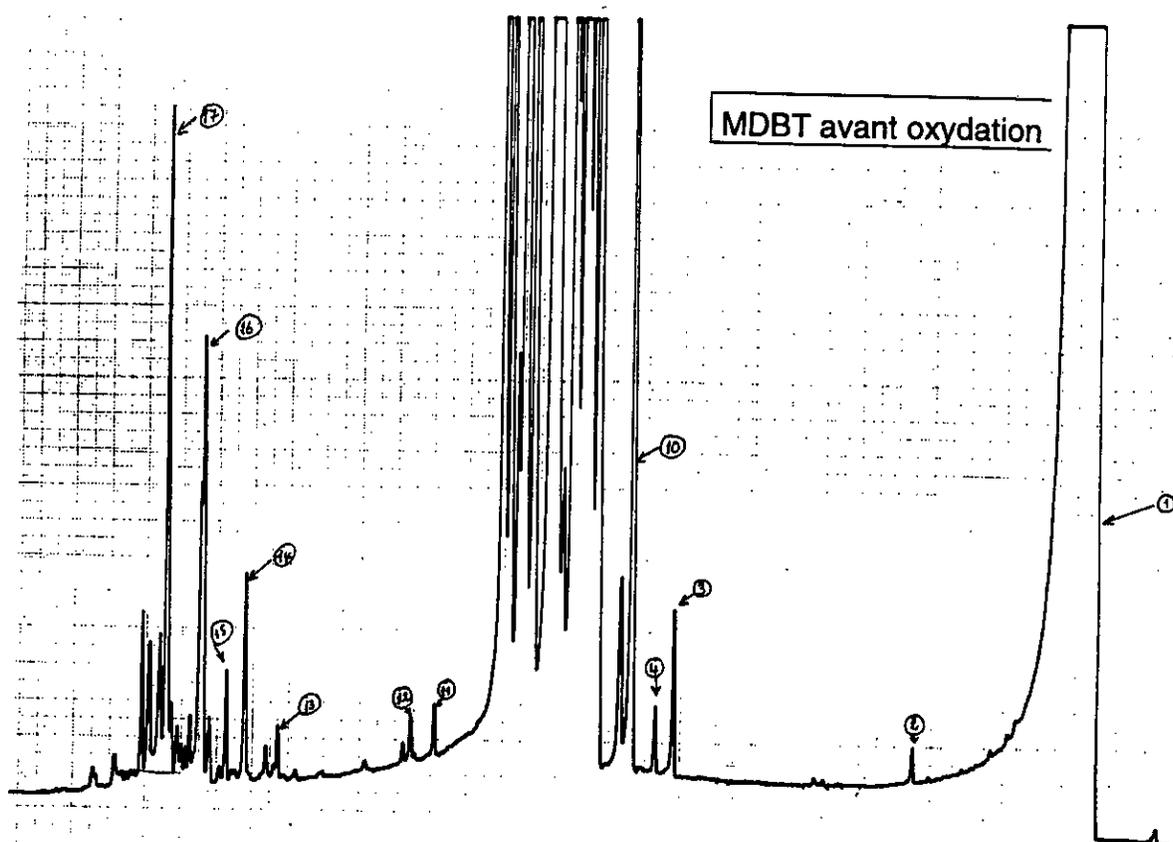


figure 11 a: Chromatogramme du M/DBT;

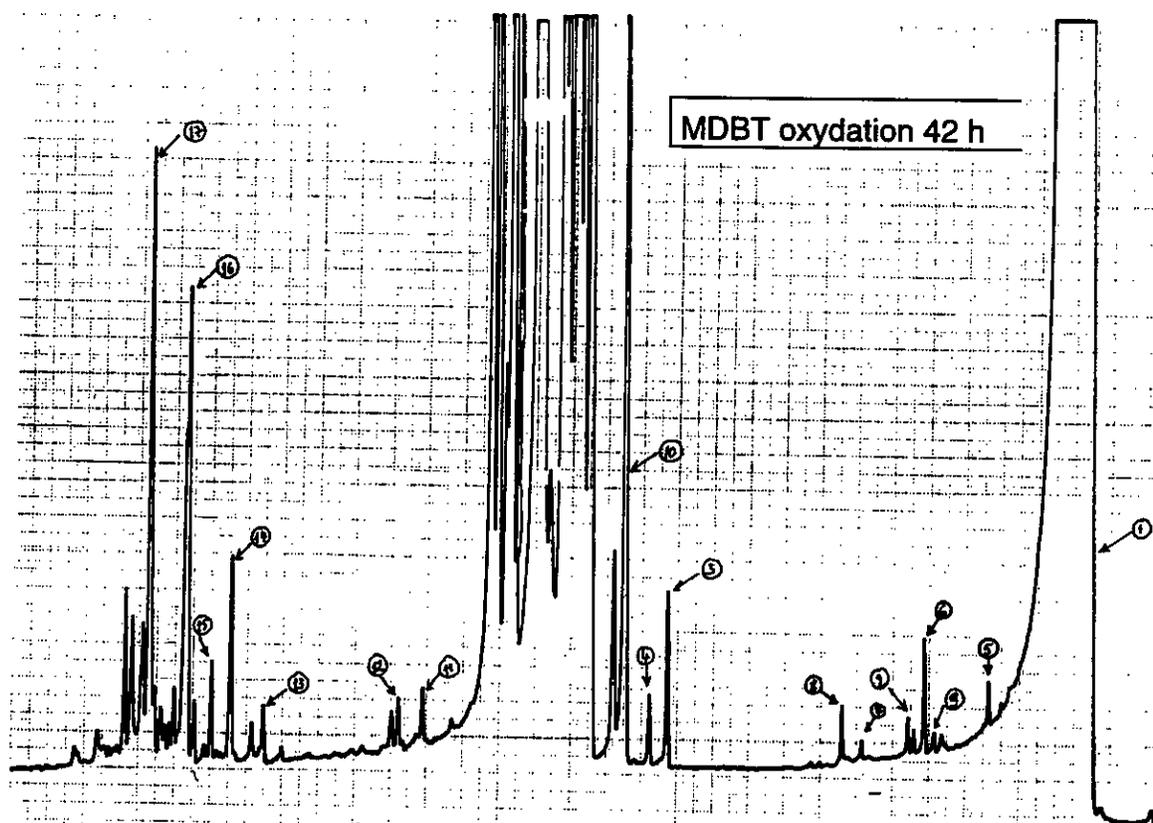


figure 11b: Chromatogramme du M/DBT après oxydation thermique à 80°C pendant 24 heures.

Pour étudier l'influence de l'oxydation du M/DBT sur le niveau des décharges dans les condensateurs, on a procédé à une oxydation thermique du M/DBT à 80°C sous 1,5 bar d'O₂ pendant 16 heures. Après oxydation ce liquide a été utilisé comme imprégnant des modèles de condensateurs. Sur la figure 12, nous avons tracé la variation de l'amplitude de la charge apparente en fonction de la tension dans ce condensateur (courbe b) que nous comparons à celle mesurée dans un condensateur imprégné de M/DBT non oxydé (courbe a). Nous remarquons que l'oxydation du liquide entraîne la diminution du seuil d'apparition des décharges. Elle est maintenant comprise entre 5,4 et 6 kV au lieu de plus de 7,2 kV.

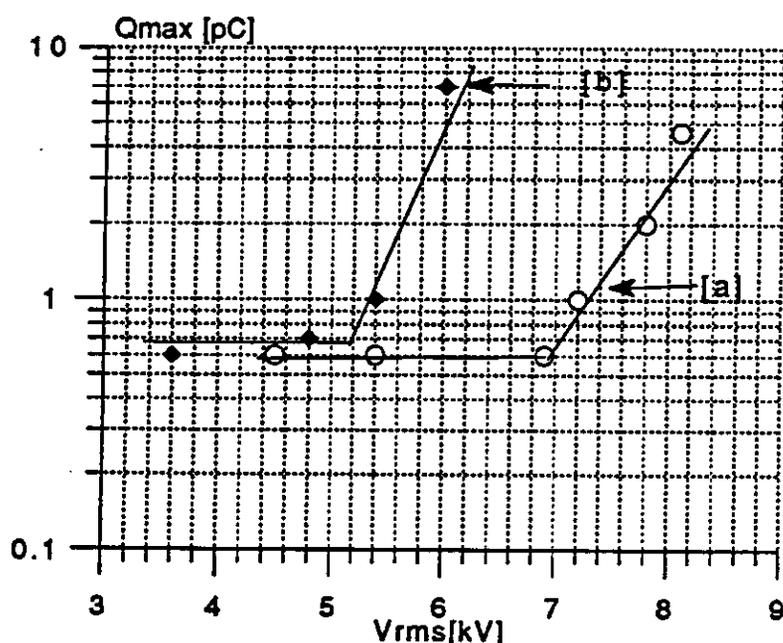


figure 12: Variation de l'amplitude de la charge apparente en fonction de la tension
a) M/DBT non oxydé;
b) M/DBT oxydé.

II.4.b: Propriétés des films de PP:

La dégradation du film de PP extrait d'un modèle de condensateur a été étudiée en mesurant sa rigidité diélectrique sous rampe de tension de 500 V/s en différents endroits entre une bille en acier inox de diamètre 2,5 mm et un plan. En déplaçant la

bille sur la surface du film, on obtient un réseau de points avec les tensions de claquage correspondantes que nous analysons à l'aide de la statistique de Weibull. Sur la figure 13, nous avons tracé la probabilité de claquage d'un film de PP de 13,6 μm en fonction de la tension appliquée avant et après vieillissement. On remarque que pour une probabilité cumulée de 63,8% la tension de claquage du film n'est pas sensiblement affectée par le vieillissement et est égale à 7,5 kV ; mais il apparaît des points à très faible tension de claquage (inférieure à 4 kV) situés dans la couronne sous champ électrique.

Ces essais nous permettent de conclure que pendant le vieillissement V_{i3} (4,1 kV, 80°C, 1,5 bar de O_2), la dégradation du PP n'est pas initiée par des espèces créées par des décharges. Nous ne détectons pas de décharges $> 1 \text{ pC}$ avec une fréquence moyenne supérieure à $0,02 \text{ s}^{-1}$. Le mécanisme créant des espèces intervenant dans la formation de macroradicaux polypropylène serait donc de nature électrochimique et lié au transfert d'électrons aux électrodes. L'intervention de l'oxygène, beaucoup plus importante d'après nos essais que celle de la température, se ferait essentiellement au niveau de la propagation de la dégradation, comme le montrent d'autres travaux [14].

Par contre un problème subsiste: C'est celui de la nature du claquage du condensateur après 20 heures de vieillissement V_{i2} , ou V_{i3} à 4,1 kV quand la tension est augmentée par paliers, entre 5 et 6 kV. Nos mesures sur le PP montrent que certains points du film présentent une faible tension de claquage. Le claquage du film est-il thermique ou fait suite à une décharge perçant le diélectrique ? Nos résultats expérimentaux ne permettent pas d'écarter l'initiation par une décharge, car le seuil d'amorçage de ces décharges est abaissé après oxydation du liquide, entre 5,4 et 6 kV.

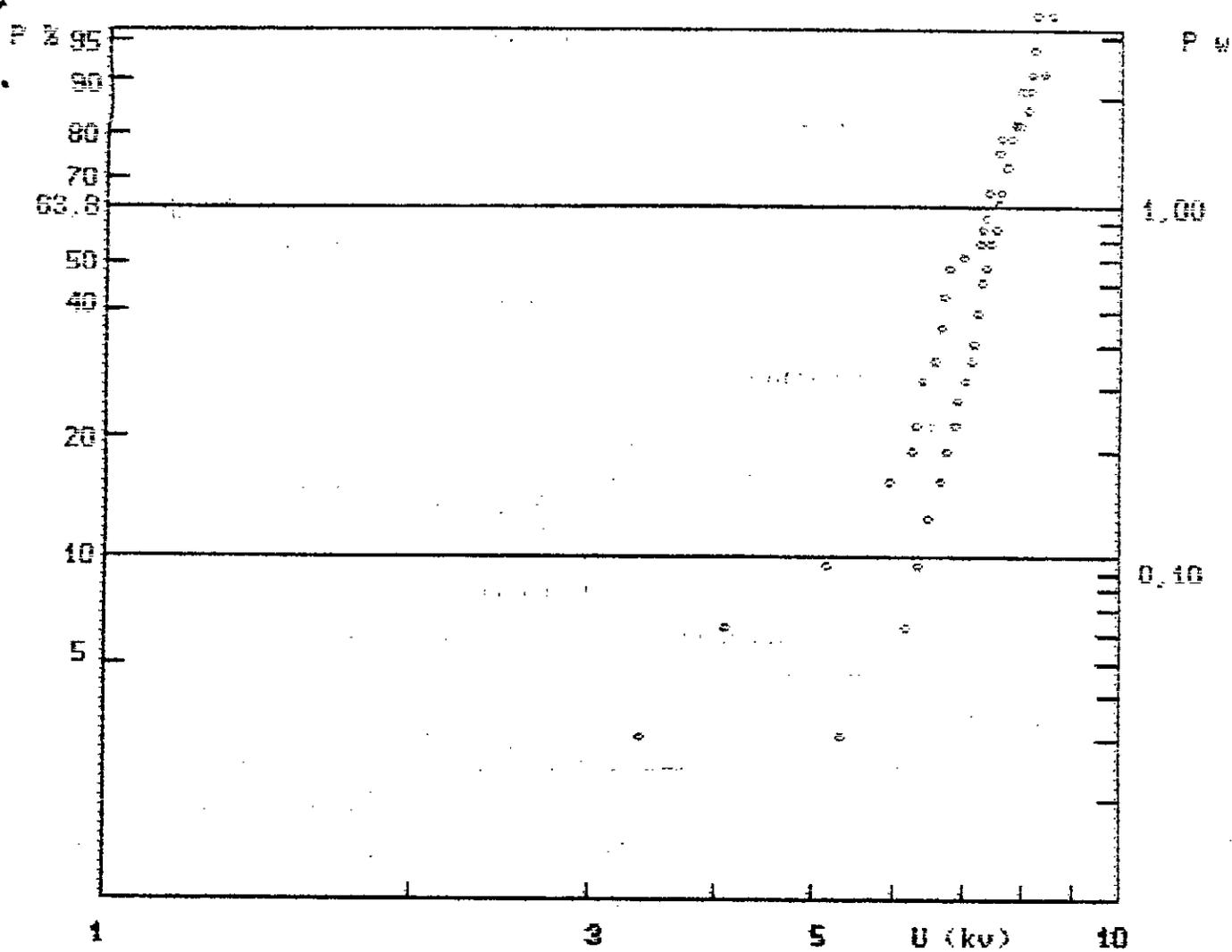


figure 13: Variation de la probabilité de claquage d'un film de PP de $13,6 \mu\text{m}$ en fonction de la tension ;
 a) film neuf
 b) film vieilli dans les conditions Vi3.

DISCUSSION et CONCLUSION:

Dans cette partie, nous avons déterminé les conditions dans lesquelles des décharges apparaissent dans les modèles de condensateur dont nous étudions le vieillissement. Nous avons également caractérisé ces décharges. Il apparaît une nette différence dans les résultats concernant des modèles imprégnés au n-décane ou avec le M/DBT. Si dans les deux cas, les décharges se produisent en bordure d'électrode, ces décharges se différencient par leur amplitude, leur fréquence moyenne et leur développement à partir des électrodes. Dans le M/DBT, liquide aromatique, leur charge apparente et leur fréquence sont plus faibles, on n'observe pas de décharges rampantes sur le film isolant comme dans le n-décane. Peu de travaux ont porté sur les phénomènes prédisruptifs dans ces liquides. Dans une étude en cours entre pointe et plan permettant d'atteindre des champs très intenses, nous avons constaté que dans des conditions similaires, de rayon de courbure de la pointe notamment, les décharges dans le M/DBT avaient une charge apparente environ 5 fois plus faible que dans le n-décane. Les décharges détectées pour des tensions voisines de la tension seuil sont dans le n-décane des décharges négatives (polarité négative de la pointe) alors que dans le M/DBT, ce sont des décharges des deux signes.

L'explication des différences observées entre un liquide aromatique et un hydrocarbure saturé sort du cadre de cette étude, où la configuration du modèle de condensateur (géométrie d'électrodes, présence du film isolant) rend les phénomènes particulièrement complexes. Elle tient certainement à la façon dont un électron peut échanger de l'énergie avec les molécules du liquide dans une région de champ électrique intense (environ 5 à 10 MV/cm).

L'influence sur les phénomènes prédisruptifs dans un liquide d'une pression hydrostatique est un phénomène mieux connu [15, 16]. Le phénomène initial est une avalanche électronique qui entraîne la formation d'une microbulle par vaporisation du liquide. Une pression suffisamment élevée dans le liquide empêche la formation de la bulle et son évolution en canal filamentaire. La charge apparente que nous mesurons est la somme celle due à l'avalanche, indépendante de la pression et de celle due aux décharges dans la phase gazeuse, fonction de la pression appliquée. La décharge totale est donc diminuée par l'application d'une pression sur le liquide. La variation du seuil d'apparition des décharges que nous observons quand nous appliquons 5 bars sur le liquide est donc due à une diminution de l'amplitude de la décharge, à une valeur inférieure à la limite de détection de notre appareillage.

La variation de tension d'apparition des décharges avec l'épaisseur du diélectrique entre les électrodes est tout-à-fait analogue à ce qui est observé quand le liquide est remplacé par un gaz [17, 18]. Dans notre système, si les décharges sont initiées en bord d'électrode présentant un rayon de courbure r , d l'épaisseur du film diélectrique et E le champ électrique sur le bord, la relation entre E et la tension appliquée V_a est :

$$V_a = kdE / (1+d/r)^{1/2}$$

k est une constante. Si la première décharge apparaît quand le champ E atteint une valeur critique E_0 caractéristique du liquide, cette décharge est alors détectée à une tension

$$V_a = kr^{1/2}E_0d^{1/2}$$

proportionnelle à $d^{1/2}$ si $d \ll r$. En effet, l'observation à l'aide d'un intensificateur d'image montre que les décharges sont initiées en bord d'électrode.

En conclusion, au cours de ce travail, nous avons montré que dans les condensateurs au PP imprégné, la nature de l'imprégnant intervient sur le seuil d'apparition des décharges, leur amplitude et leur propagation. Ce seuil a été déterminé par rapport à un niveau minimum pris légèrement supérieur à la sensibilité du système de détection utilisé. Le claquage des condensateurs imprégnés au M/DBT au cours du vieillissement à 4,1 kVeff, 80°C et 1,5 bar d'O₂ n'est pas dû aux décharges partielles mais à la dégradation du film de PP sous contraintes électriques et thermiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] E. SEBILLOTTE, B. GOSSE, J.P. GOSSE, S. SAID et S. THEOLEYRE
Dégradation sous champ intense de films de polypropylène imprégnés.
Revue Générale d'Electricité, N° 8, p. 25, Septembre 1990.

- [2] E. SEBILLOTTE, S. THEOLEYRE, S. SAID, B. GOSSE and J.P. GOSSE
AC degradation of impregnated polypropylene films.
I.E.E.E. Trans. on Elect. Insul., Vol. 27, N°.3, p. 557, June 1992.

- [3] C. MENGUY
Mesure de l'énergie des décharges partielles et dégradation des isolants.
Revue Générale d'Electricité N° 8, p. 45, Septembre 1990.

- [4] W. PLEIFFER
High-frequency voltage stress of insulation.
I.E.E.E. Trans. on Elect. Insul., Vol. 26, N° 2, p. 239, April 1991.

- [4] J. GALAND, J. GOLINSKI et K. LABUS-NAWRAT
La détection des décharges partielles.
Revue Générale d'Electricité, Tome 81, N° 12, p. 844, Décembre 1972.

- [5] E. SEBILLOTTE
Dégradation sous champ électrique alternatif du polypropylène imprégné.
Influence des époxydes.
Thèse de Doctorat de l'INPG (Grenoble 1989).

- [6] A.E.W. AUSTEN and S. WHITCHEAD
Proc. Inst. Elect. Eng. Pt II, 88, p. 88, 1941.

- [7] E. BABULA, A. SIEROTA, S. ZOLEDZIOWSKI and J.H. CALDERWOOD
Surface partial discharges in moist dielectric liquids.
I.E.E.E. Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-20, N°.2, p. 299, April 1985.

- [8] J. AUSTIN and R.E. JAMES
On-line digital computer system for measurement of partial discharges in insulation structures.
I.E.E.E. Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-11, N° 4, p. 129, December 1976.
- [9] H.F. CHURCH
Partial discharges phenomena in power capacitors.
Electra, 21, 30-54, 1969.
- [10] W.J. SARJEANT
Capacitors.
I.E.E.E. Trans. on Elect. Insul., Vol. 25, N° 5, p. 861, October 1990.
- [11] A. M. THOMAS
Heat developed and powder Lichtenberg figures and the ionization of dielectric surfaces produced by electrical impulses.
Brit. J. of Appl. Phys., Vol. 2, p. 98, April 1951.
- [12] D. A. NATRASS
Partial discharge measurement and interpretation.
IEEE Electr. Mag., 4, 10-23, 1988.
- [13] A. GADOUM, B. GOSSE and J.P. GOSSE
Accelerated AC degradation of impregnated polypropylene films: Influence of the liquid and its components.
I.E.E.E. Trans. on Elect. Insul., (à paraître) 1993.
- [14] W. SCHNABEL and J. KIWI
Aspects of degradation and stabilization of polymers.
Ed. H.H.G.Jellinek, Elsevier, Amsterdam, p. 195, 1978.
- [15] A. BEROUAL, R. TOBAZEON
Effets de la pression hydrostatique sur les phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides.
C. R. Acad. des Sc. Paris, Tome 303, Série II, N° 12, p. 1081, 1986.

- [16] R. KATTAN, A. DENAT and O. LESAIN
Generation, growth and collapse of vapor bubbles in hydrocarbon liquids
under a high divergent electric field.
J. of Appl. Phys., Vol. 66, Nb. 9, p. 4062, November 1989.
- [17] M. C. HALLECK
Calculation of corona-starting voltage in a air-solid dielectric systems.
A.I.E.E. Trans., 75, p. 211, 1956.
- [18] H. BERTEIN
Etude du mécanisme de la perforation des isolants solides sous l'action des
décharges partielles.
Revue Générale d'Electricité, 79, N° 6, p. 497, 1970.

CHAPITE 2

**DECHARGES DANS UNE INTERSTICE
DE LIQUIDE**

Introduction:

Dans les isolations solides, les vacuoles gazeuses sont une source privilégiée de décharges. Ce cas a été largement étudié et l'évolution spatio-temporelle de ces décharges est maintenant connue [1]. Nous rappelons ici les résultats de certains travaux ayant trait à des cavités liquides ou gazeuses associées à des diélectriques solides:

PRIAROGGIA et al [2] ont montré que le champ de claquage des condensateurs au papier imprégné d'huile minérale dépend de l'épaisseur de la cavité et de la nature de l'interface. Quand l'épaisseur de la cavité varie de 0,08 à 0,4 mm, la tension de claquage diminue de 50% si la cavité est située entre 2 films de papier et de 65% si la cavité est adjacente à l'électrode métallique. LAGHARI et al [3] dans leur étude sur l'influence de l'imprégnation sur le claquage des films de polypropylène, ont montré que l'adjonction d'une cavité d'air de 25 μm entre deux films de même épaisseur ne provoque pas de diminution significative de la tension de claquage ($< 1\%$). CHANG [4] a analysé numériquement la distribution du champ électrique dans une structure diélectrique munie d'une cavité. Il a montré que le renforcement du champ dans la cavité dépend de la permittivité du milieu, des paramètres géométriques (épaisseur de cavité / épaisseur totale) et de l'orientation de cette cavité par rapport à la direction du champ. MALIK et al [5], dans leur étude des décharges dans des cavités gazeuses dans les câbles, ont montré qu'il existe une taille critique de cavité pouvant être tolérée dans les câbles sans risque d'apparition de décharges et que la tension d'apparition des décharges est la plus faible quand la cavité est au contact de l'électrode. ROBINSON [6] a mis en évidence que la tension d'apparition des décharges est proportionnelle à la distance du conducteur à la cavité et a donné une expression de la charge apparente à partir du schéma équivalent a,b,c [7]:

$$Q_a = 2V_i (C_b / (C_b + C_c))^2 (C_c + C_a C_b / (C_a + C_b)),$$

où V_i est la tension d'apparition des décharges; C_a la capacité de l'isolant en parallèle avec la cavité; C_b la partie de l'isolant en série avec cette cavité et C_c la capacité de la cavité elle-même. Cette expression a trouvé une vérification expérimentale pour des cavités de surface comprise entre 7 et 180 mm^2 . DANIKAS [8,9] a comparé les valeurs des charges apparentes mesurées dans des cavités d'air d'épaisseur comprise entre 0,16 et 0,64 mm entre deux films de polyéthylène aux valeurs théoriques calculées à l'aide du modèle de Pedersen [10] et du modèle capacitif. Le modèle de Pedersen permet de calculer la charge apparente à partir du

champ électrique d'apparition des streamers en tenant compte du volume effectif de la cavité dans lequel ont lieu les décharges et non du volume total. Ce modèle donnait des valeurs de charges apparentes proches de celles mesurées. MASON [11] a étudié l'influence de la forme et de la taille d'une inclusion gazeuse sur la tension d'apparition des décharges. Il a donné une expression permettant de prédire la tension d'apparition des décharges dans une cavité d'air à 15% près. Dans le cas d'une cavité sous forme d'un disque où son diamètre D est très grand devant son épaisseur t , la tension d'apparition des décharges est

$$V_i = E_{g0} t [A + e_r (1+B)] / [A + (1+B)^2].$$

Cette tension dépend du champ électrique E_g d'amorçage des décharges dans la cavité seule (champ de Paschen) et des paramètres A et B qui tiennent compte de la forme et des dimensions de cette cavité. Cette expression suppose que les milieux en présence (solide et gaz) sont des isolants parfaits. KREUGER [7] a remarqué qu'une cavité située du côté de l'électrode métallique engendre des décharges non symétriques (un grand nombre de petites décharges dans une 1/2 période et un petit nombre de grosses décharges dans l'autre). Le rapport des amplitudes dans ce cas varie de 3 à 10.

Peu de travaux ont porté sur le comportement sous décharges des isolations imprégnées et plus particulièrement des condensateurs. Durant leur fabrication, la formation des plis au cours du bobinage et lors de l'aplatissement des galettes fait que des poches de liquide peuvent rester piégées entre parois isolantes ou conductrices. Elles constituent des points à plus faible rigidité diélectrique [12].

Dans le but de simuler ces types de défauts et de caractériser les décharges qu'ils peuvent occasionner, nous étudions les décharges dans des cavités de liquide dans des modèles de condensateurs au polypropylène imprégné. Nous abordons l'influence de la nature de l'interface au voisinage de la cavité (sa position dans le condensateur), celle des dimensions de cette cavité et de la tension appliquée. Nous localisons les zones d'apparition des décharges à l'aide d'un intensificateur d'image et nous analysons l'action des décharges sur la dégradation du film de polypropylène par spectroscopie IRTF.

I. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les modèles de condensateurs sont ceux décrits dans le chapitre précédent et sont constitués de films de polypropylène imprégnés de n-décane ou de M/DBT entre deux électrodes métalliques planes et parallèles de diamètre 8 et 30 mm respectivement. Nous avons montré dans un chapitre précédent que pour les deux liquides imprégnants les décharges apparaissent en bordure de la petite électrode mais à un niveau de tension (V_a) supérieur dans le cas des condensateurs au M/DBT. A titre d'exemple, pour un condensateur à deux films de PP de $13,6 \mu\text{m}$ la tension d'apparition des décharges est $V_a=7 \text{ kV}$ dans le M/DBT alors qu'elle est égale à $4,8 \text{ kV}$ dans le n-décane.

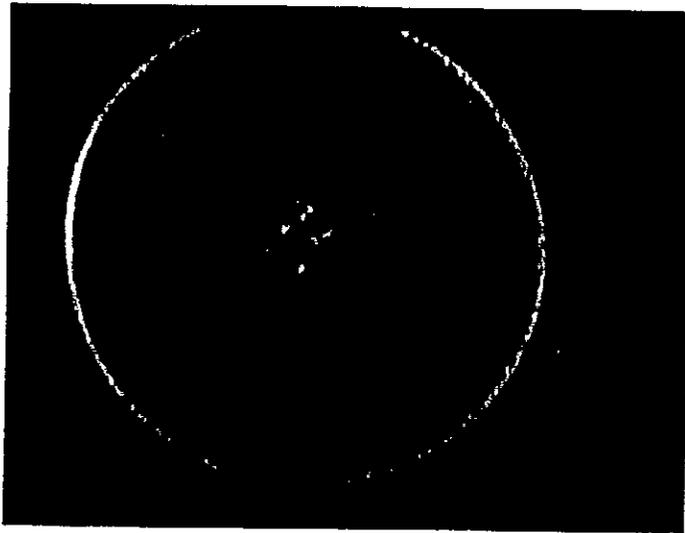
La cavité de diamètre 3mm est réalisée dans un film de PP. Elle constitue bien le point faible de l'isolation: En effet, la visualisation des zones d'émission de lumière à l'aide d'un intensificateur d'image a permis de mettre en évidence que les décharges apparaissent dans les cavités de liquide (n-décane ou M/DBT). Sur les photos de la figure II.1 correspondant à des cavités de M/DBT, nous observons des points lumineux en bordure de la cavité et aucune émission de lumière en bordure des électrodes. Il faut remarquer que dans 90% des cas, le claquage des condensateurs se produit en bordure de cette cavité. Ceci est dû à des aspérités provenant du procédé de fabrication des cavités (découpe à l'emporte-pièce).

I.1: Cavité au milieu du diélectrique:

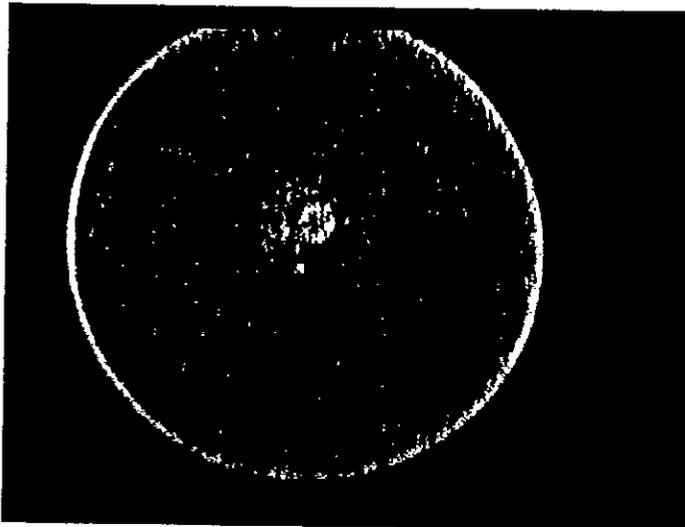
Nous étudions les décharges électriques dans des modèles de condensateurs au PP imprégné de n-décane contenant une cavité placée soit entre trois films de $13,6 \mu\text{m}$, soit entre deux films de $5 \mu\text{m}$.

I.1 a: Cavité entre trois films de $13,6 \mu\text{m}$:

La tension V_a d'apparition des décharges est déterminée comme nous l'avons définie dans le chapitre précédent, à partir de la variation de leurs caractéristiques en fonction de la tension appliquée et de la distribution des décharges dans le cycle. Elle correspond à la valeur efficace de la tension appliquée au dessus de laquelle apparaissent des décharges d'une certaine amplitude et une certaine fréquence. Sur la figure II.2 nous donnons la distribution dans le cycle du nombre de décharges qui apparaissent à la tension V_a pour les cas d'un modèle de condensateur à trois films de $13,6 \mu\text{m}$ (a), trois films avec cavité de $5 \mu\text{m}$ (b) et trois films avec cavité de $2,5 \mu\text{m}$ (c). Sur le tableau II.1 nous donnons les différentes caractéristiques des décharges qui apparaissent à la tension V_a pour ces trois cas.



[a]



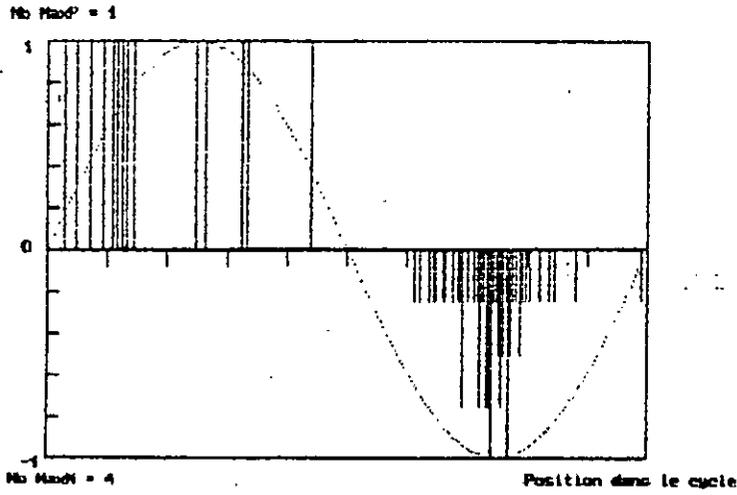
[b]

Figure II.1: Photos des zones d'émission de lumière. Modèle de condensateur muni d'une cavité placée côté HT.

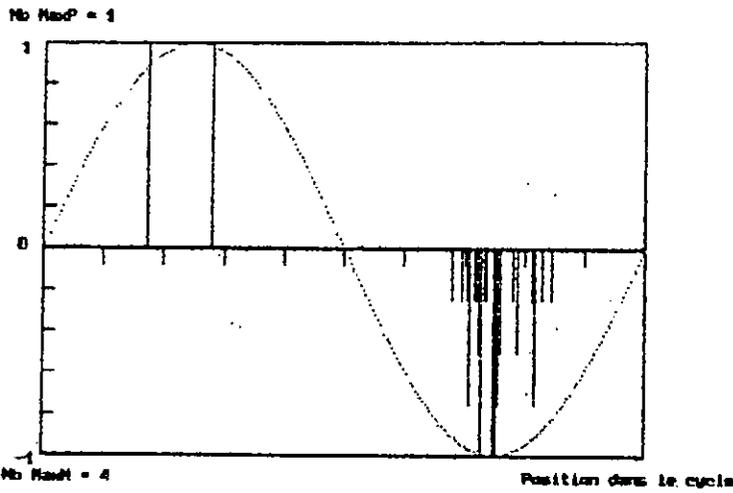
a) $V=4,8$ kV

b) $V=5,3$ kV

a) Condensateur à 3 films de PP de 13,6 μm .



b) Avec cavité de 5 μm .



c) Avec cavité de 10 μm .

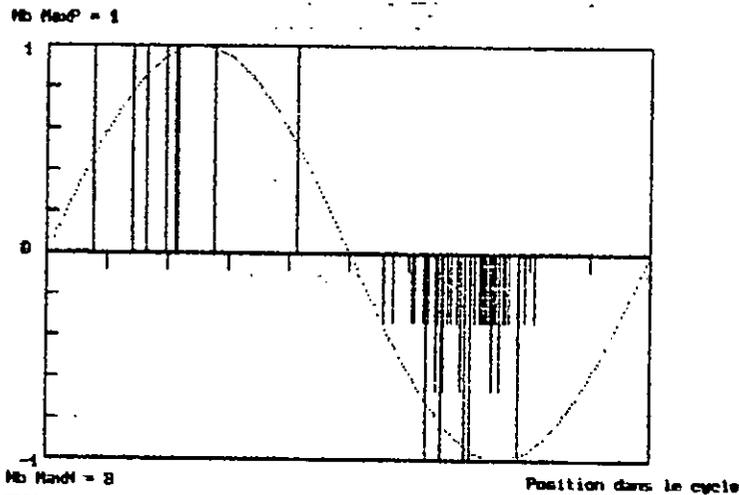


Figure II.2: Distribution du nombre de décharges dans le cycle à $V=V_a$. Modèles de condensateur imprégné au n-décane.

Tableau II.1

	Va [kV]	Q _{m+} [pC]	Q _{m-} [pC]	P0(φ1+) [°]	P0(φ1-) [°]	n-/n+	E _l [V/μm]
3 films de 13.6 μm	6	24.5	1.8	50	270	0.65	
Cavité de 5 μm	6	0.3	2.8		270	8.4	143
Cavité de 10 μm	5.7	35	0.96		270	4.1	121

Dans ce tableau, Q_{m+} et Q_{m-} sont respectivement les valeurs maximales des charges positives et négatives, P0(φ1+) et P0(φ1-) sont les phases les plus probables d'apparition des premières décharges positives et négatives. Nous remarquons qu'en présence de cavités, les décharges sont essentiellement négatives (le rapport du nombre de décharges négatives aux décharges positives est n-/n+ >> 1) et elles apparaissent au maximum de la tension appliquée. Si e_l et ε_l sont respectivement l'épaisseur et la permittivité relative du liquide et e_p et ε_p les valeurs correspondantes du polypropylène, le champ électrique dans le liquide E_l, avec l'hypothèse d'une répartition capacitive de la tension, est donné par l'expression:

$$E_l = V_a / (e_l + e_p \cdot \epsilon_l / \epsilon_p).$$

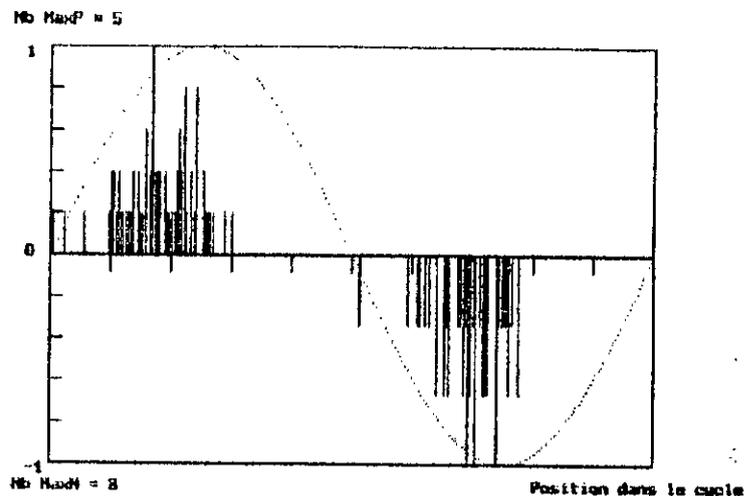
Nous constatons que les décharges apparaissent pour un champ dans le liquide > 100 V/μm [tableau II.1]. Cette valeur est supérieure au champ de claquage du liquide seul entre électrodes métalliques (# 65 V_{eff}/μm) [13].

I.1. b: cavité entre deux films de 5 μm:

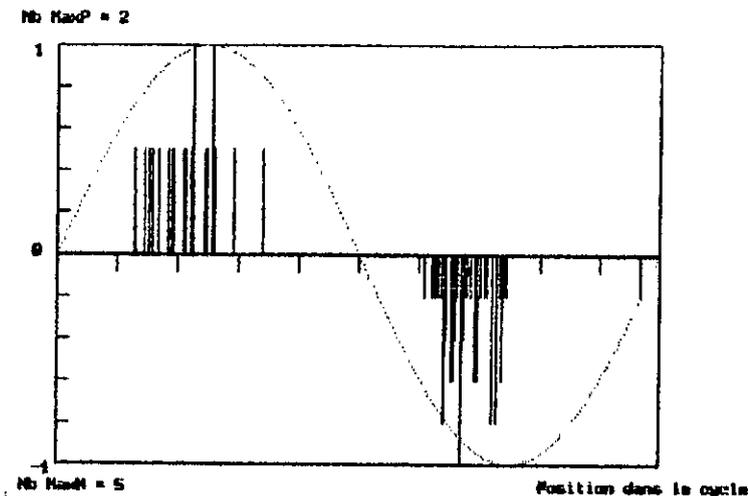
Ce cas correspond à des modèles de condensateurs constitués de deux films de polypropylène lisse de 5 μm d'épaisseur entre lesquels nous inserons un ou deux films de différentes épaisseurs munis d'une cavité de 3 mm de diamètre.

Sur la figure II.3 nous montrons la distribution des décharges dans le cycle à V=V_a dans les cas de deux films de 5 μm seuls (a), avec une cavité de 5 μm (b), une cavité de 10 μm (c) et avec une cavité de 13,6 μm (d). Nous constatons alors que dans les quatre cas, la phase d'apparition des décharges négatives est comprise dans l'intervalle (1,1-1,5)π et donc une dissymétrie par rapport au maximum de la

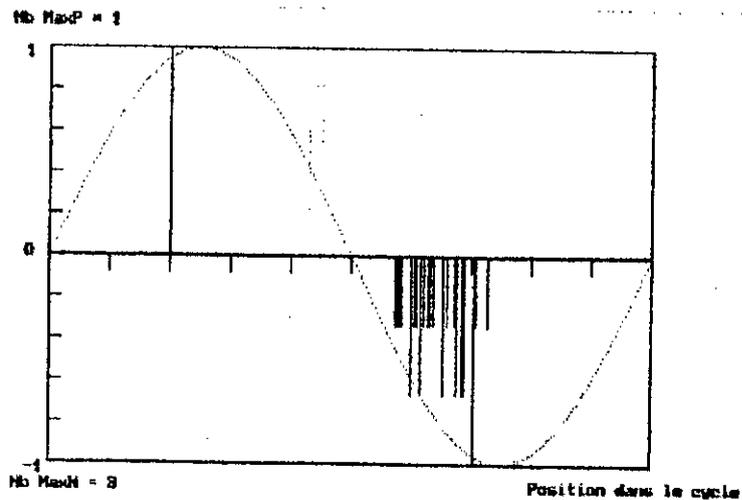
a) Condensateur à 2 films de PP de 5 μm .



b) Condensateur à 2 films de PP de 5 μm avec cavité de 5 μm .



c) Condensateur à 2 films de PP de 5 μm avec cavité de 10 μm .



d) Condensateur à 2 films de PP de 5 μm avec cavité de 13,6 μm .

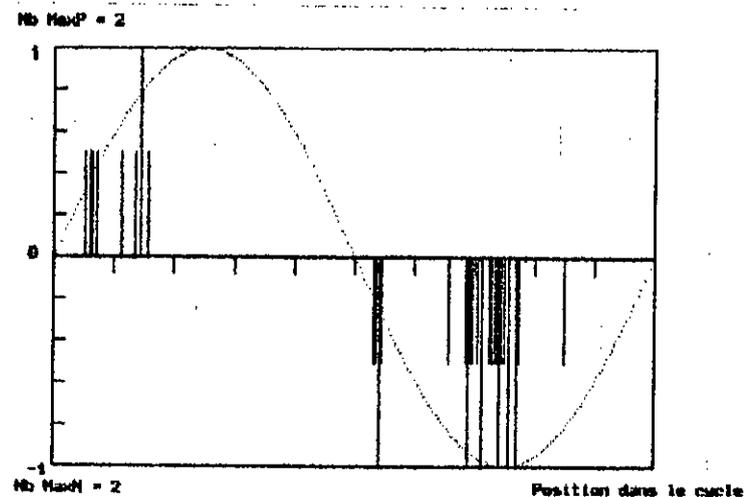


Figure II.3: Distribution du nombre de décharges dans le cycle à $V=V_a$.
Modèles de condensateur imprégné au n-décane.

tension c'est-à-dire que les décharges négatives n'apparaissent que sur le front montant de la tension. Dans le tableau II.2, nous donnons les différentes caractéristiques des décharges qui ont eu lieu à $V=V_a$ dans les cas cités ci-dessus.

Tableau II.2

	Va [kV]	Q _{m +} [pC]	Q _{m -} [pC]	P0(φ1+) [°]	P0(φ1-) [°]	n-/n+	EI [V/μm]
2 films de 5 μm	2.7	14	5	50-60	140-150	0.85	
Cavité de 5 μm	2.7	0.6	1.0	80-85	230	1.9	143
Cavité de 10 μm	3.3	0.3	0.6		240	7.5	121
Cavité de 13.6 μm	3.6	1.8	1.9		260	3	121

Sur la figure II.4, nous avons représenté la variation de la tension V_a en fonction de l'épaisseur totale du diélectrique e (cavité comprise) (courbe a) que nous avons comparée avec la variation en $e^{1/2}$ attendue en absence de cavité quand les décharges apparaissent en bordure d'électrode (courbe b) (chapitre I). Nous remarquons que l'adjonction d'une cavité d'épaisseur comparable ou supérieure à l'épaisseur du diélectrique diminue sensiblement la tension d'apparition des décharges.

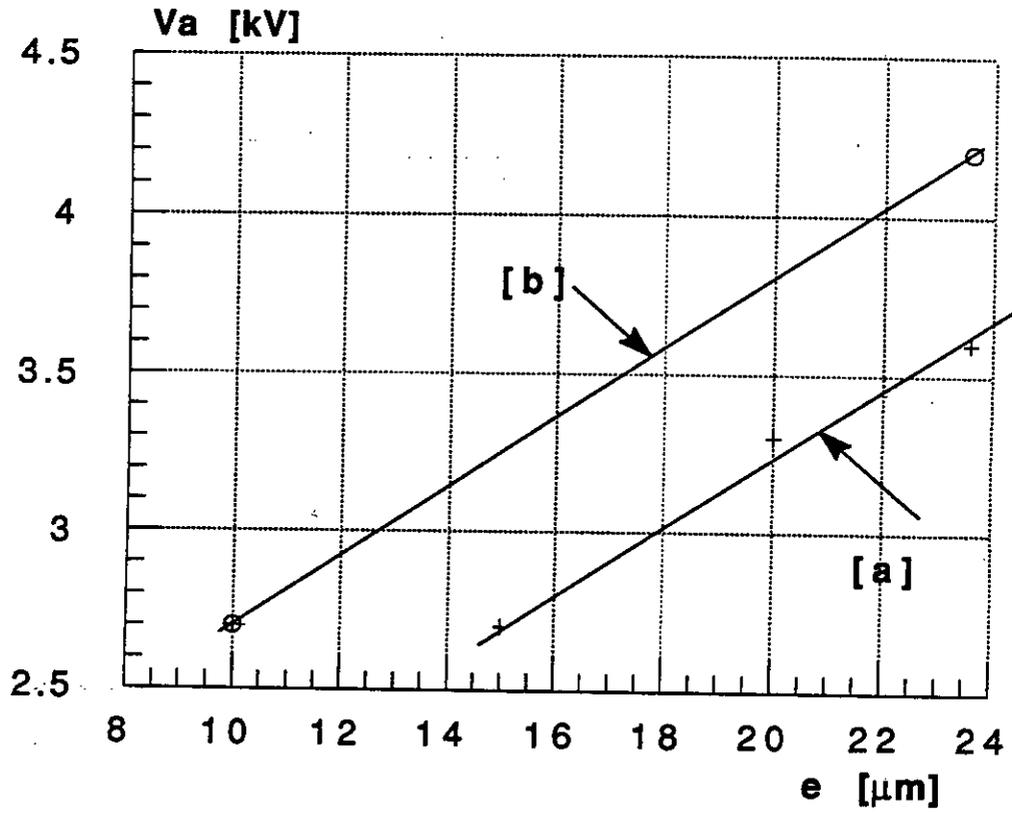


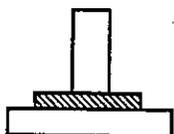
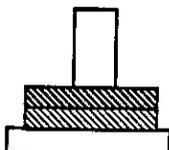
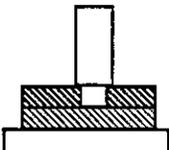
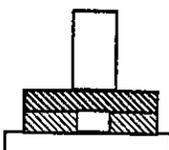
Figure II.4: Variation de la tension V_a en fonction de l'épaisseur totale du diélectrique.

- a) Points expérimentaux de la figure II.3
- b) Valeurs calculées pour une variation en $V^{1/2}$.

I. 2: Cavité au contact de l'électrode:

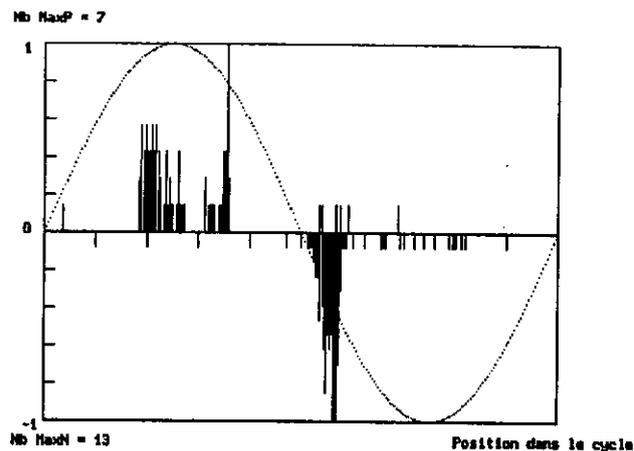
Nous étudions les décharges dans une cavité de n-décane de $13,6 \mu\text{m}$ d'épaisseur au contact de l'électrode dans deux positions différentes (tableau II.3) que nous comparons aux cas limites de un et deux films pleins (configuration 1 et 2). Sur la figure II.5, nous montrons la distribution des décharges dans le cycle à $V=V_a$ dans les quatre configurations telles qu'elles sont schématisées dans le tableau II.3. Les décharges apparaissent au voisinage du maximum de la tension sauf dans le cas de la configuration 1 où elles ont lieu au voisinage du passage par zéro. Sur la figure II.6 nous avons tracé la variation de l'amplitude de la charge apparente en fonction de la tension appliquée au modèle de condensateur dans les quatre configurations. Nous remarquons qu'à $V>V_a$, l'amplitude de la charge croît rapidement dans les configurations 1 et 3. Dans le premier cas ceci est dû au champ électrique élevé ($220 \text{ V}/\mu\text{m}$) et à la position de la cavité au voisinage d'une zone de renforcement de champ (bord d'électrode) dans le second cas.

Tableau II.3

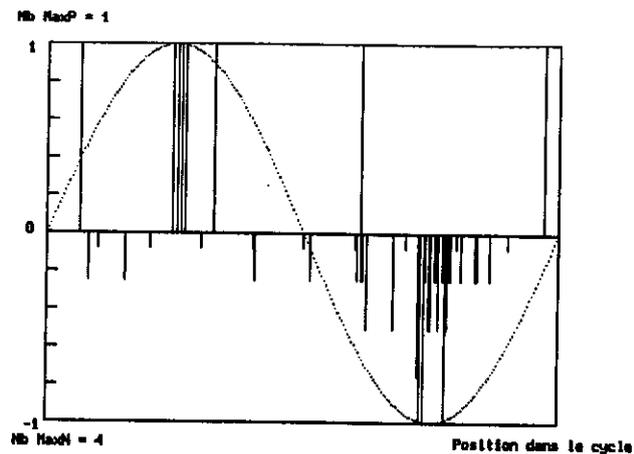
	Config.1	Config.2	Config.3	Config.4
Schéma				
V_a [kV]	3	4,8	3,3	3,9
Q_{m+} [pC]	85	1,2	1,8	1,8
Q_{m-} [pC]	1,2	3,8	1,2	2
n-/n+	1,2	4,4	33	1,5
E_l [V/ μm]			138,5	163,7
E_l / E_m			1,14	1,14

Dans ce tableau, E_m est le champ moyen calculé à $V=V_a$. Le rapport n-/n+ possède la valeur la plus élevée (plus grande dissymétrie) dans la configuration 3. On constate donc que la présence d'une cavité en contact avec l'électrode de petit diamètre (config.3) abaisse la tension V_a de 34% par rapport au cas de deux films pleins (config.2), par contre cette tension n'est abaissée que de 22% si elle est du côté de la grande électrode (config.4).

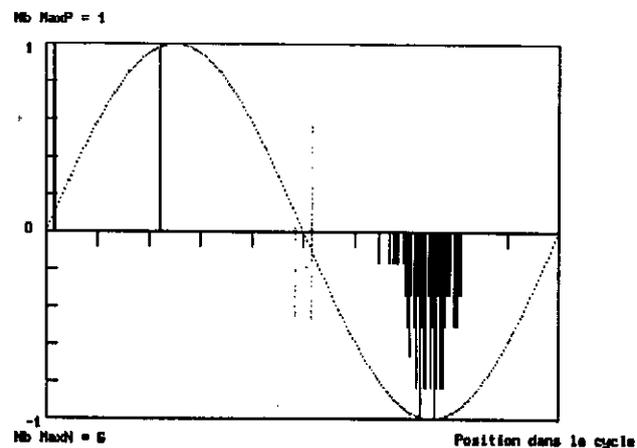
a) configuration 1



b) configuration 2



c) configuration 3



d) configuration 4

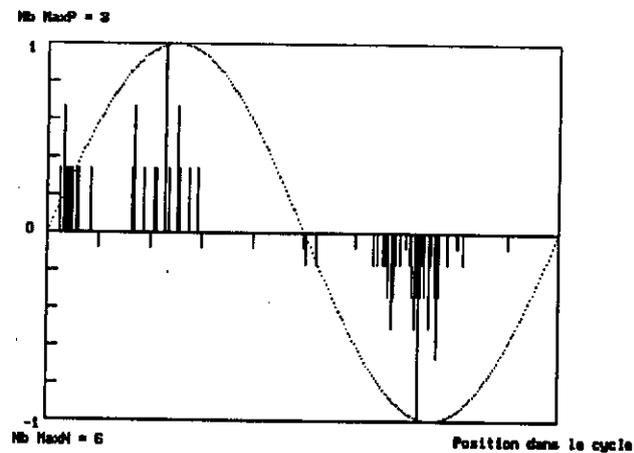


Figure II.5: Distribution du nombre de décharges dans le cycle à $V=V_a$.
Modèles de condensateur imprégné au n-décane.

L'utilisation d'un logiciel de calcul du champ électrique par la méthode des charges fictives [14], nous a permis d'estimer les valeurs du champ en différents points critiques des modèles de condensateurs munis d'une cavité. Nous avons considéré des condensateurs à deux films de PP de $13,6 \mu\text{m}$ d'épaisseur avec un arrondi d'électrode HT de $150 \mu\text{m}$ de diamètre, dans quatre configurations différentes. La géométrie de calcul est schématisée sur la figure II.7. Le champ électrique E_x est calculé au points A et B situés à la surface du film de PP (champ en bordure d'électrode) et aux points C et D en bordure de la cavité, quand celle-ci est située du côté de la HT ou du côté de la masse. Le point B est situé à environ $30 \mu\text{m}$ du point de contact de l'électrode avec le film. Nous calculons le rapport du champ E_x en différents points au champ moyen E_m et le résultat de calcul est porté au tableau II.4.

Tableau II.4

configuration	E_x / E_m			
	A	B	C	D
	1,08	0,6	1,005	1,006
	0,9	0,68	1,18	1,026
	1,04	0,54	0,93	1,16
	1,05	0,7	1,02	1,02

Ce calcul montre qu'en présence d'une cavité, le renforcement du champ électrique est le plus important en bordure de la cavité et en particulier quand celle-ci est située du côté de la HT. Les valeurs calculées de E_x / E_m sont du même ordre de grandeur que celles calculées à la tension V_a d'apparition des décharges (E/E_m) (tableau II.3). Le calcul du champ dans le liquide avec l'hypothèse d'une répartition capacitive de la tension V_a , n'est valable qu'à $t=0$, puisque l'apparition des décharges modifie la répartition du potentiel et donc le champ E_i . D'autre part, ce calcul ne tient pas compte du fait que les décharges n'apparaissent pas dans tout le volume de la cavité.

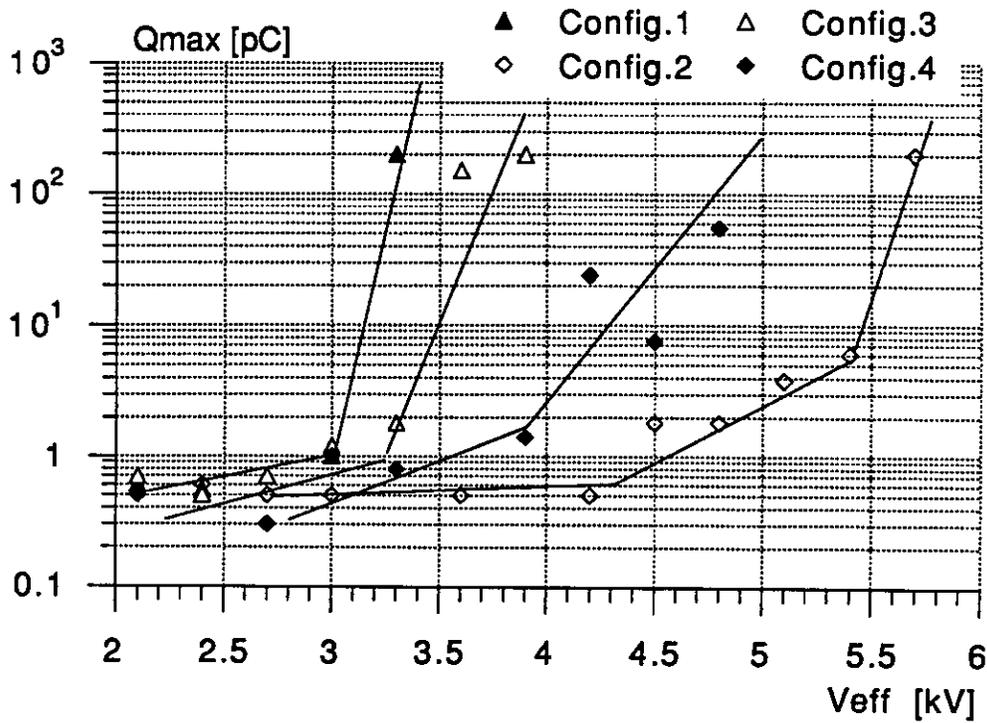


Figure II.6: Variation de l'amplitude de la charge apparente en fonction de la tension appliquée dans différentes configurations.

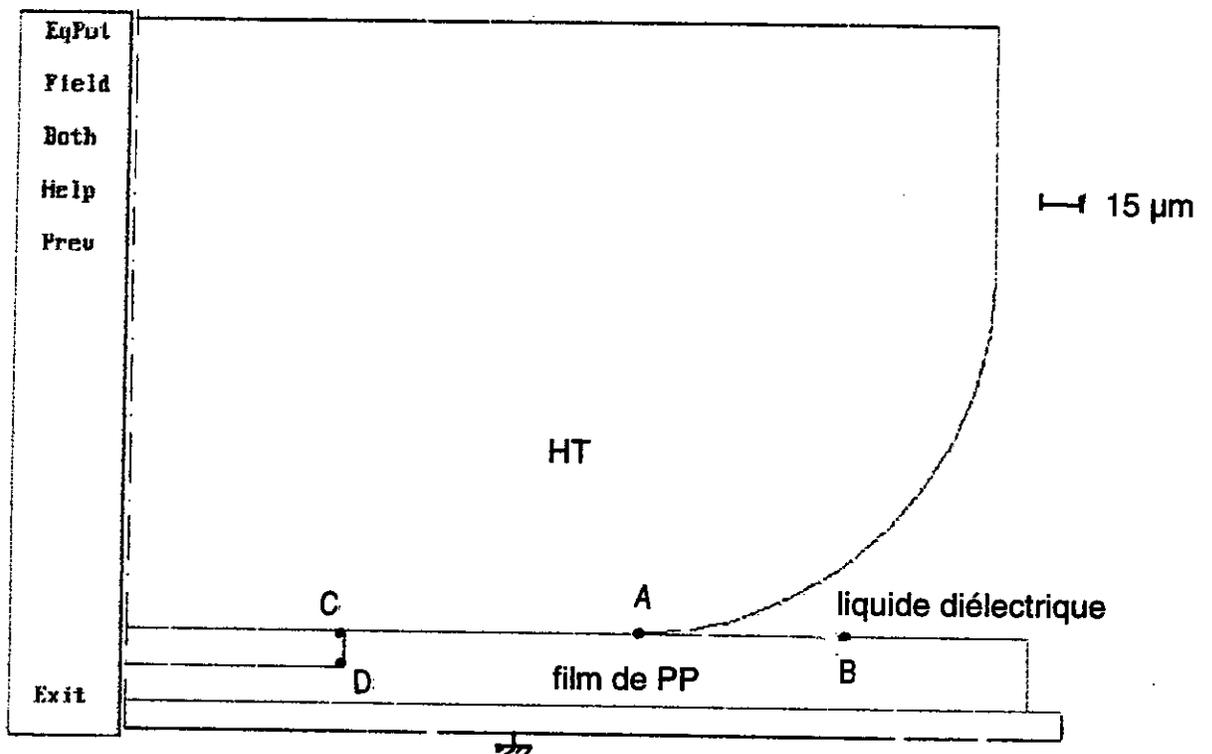


Figure II.7: Schéma de la géométrie du modèle de calcul du champ par la méthode des charges fictives.

I. 3: Analyse des films de PP:

I.3.a: Abaissement de la tension de claquage au voisinage de la cavité:

Nous avons mesuré la tension de claquage en géométrie bille/plan des films de PP de 13,6 μm ayant été soumis à des décharges en présence d'une cavité (config.3). Les tensions de claquage mesurées en différents points du film sont analysées à l'aide de la statistique de Weibull. Sur la figure II.8, nous avons tracé la probabilité de claquage du film en fonction de la tension. Nous séparons les points situés à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité. Nous remarquons que dans la zone du film en contact avec la cavité, il apparaît des points à faible tension de claquage. Dans cette zone, la tension moyenne de claquage est réduite d'environ 15%, ce qui témoigne d'une dégradation du film de PP par les décharges.

I.3.b: Analyse par IRTF:

Un film de 65 μm sur lequel est placée une cavité de 13,6 μm dans du n-décane a été soumis à 9 kV (tension $> V_a$ dans ce cas) et nous avons procédé à une acquisition continue des décharges jusqu'au claquage. L'essai a duré 3 heures. Les décharges ont été analysées par séries de 1000. Sur la figure II.9, nous avons représenté la variation de la charge apparente totale par série en fonction du n° de série. Dans cet essai, on remarque que:

- les 9 premières séries de décharges ont eu lieu en une heure. Les décharges apparaissent à une tension moyenne V_{im} comprise entre 86 et 90% du maximum de la tension appliquée et leur charge apparente totale par série est de l'ordre de 150 à 300 pC.
- les 3 séries suivantes se sont produites en deux heures. Dans ce cas les décharges apparaissent à une tension moyenne plus faible que les précédentes (77 à 85%) et leur charge apparente totale est plus élevée et atteint 480 pC.
- à la dernière série, nous remarquons une nette augmentation de la charge totale qui dépasse 1600 pC et engendre le claquage du modèle de condensateur. Nous remarquons d'après cet essai que l'élément précurseur du claquage est l'amplitude de la charge apparente et non leur fréquence. En effet, dans les séries (10 à 12) la fréquence moyenne des décharges diminue mais leur amplitude augmente ce qui a conduit au claquage du condensateur.

L'analyse par spectroscopie IRTF du film de 65 μm fait apparaître dans la zone située en bordure de la cavité un pic d'absorption à 1018 cm^{-1} (figure II.10). Nous

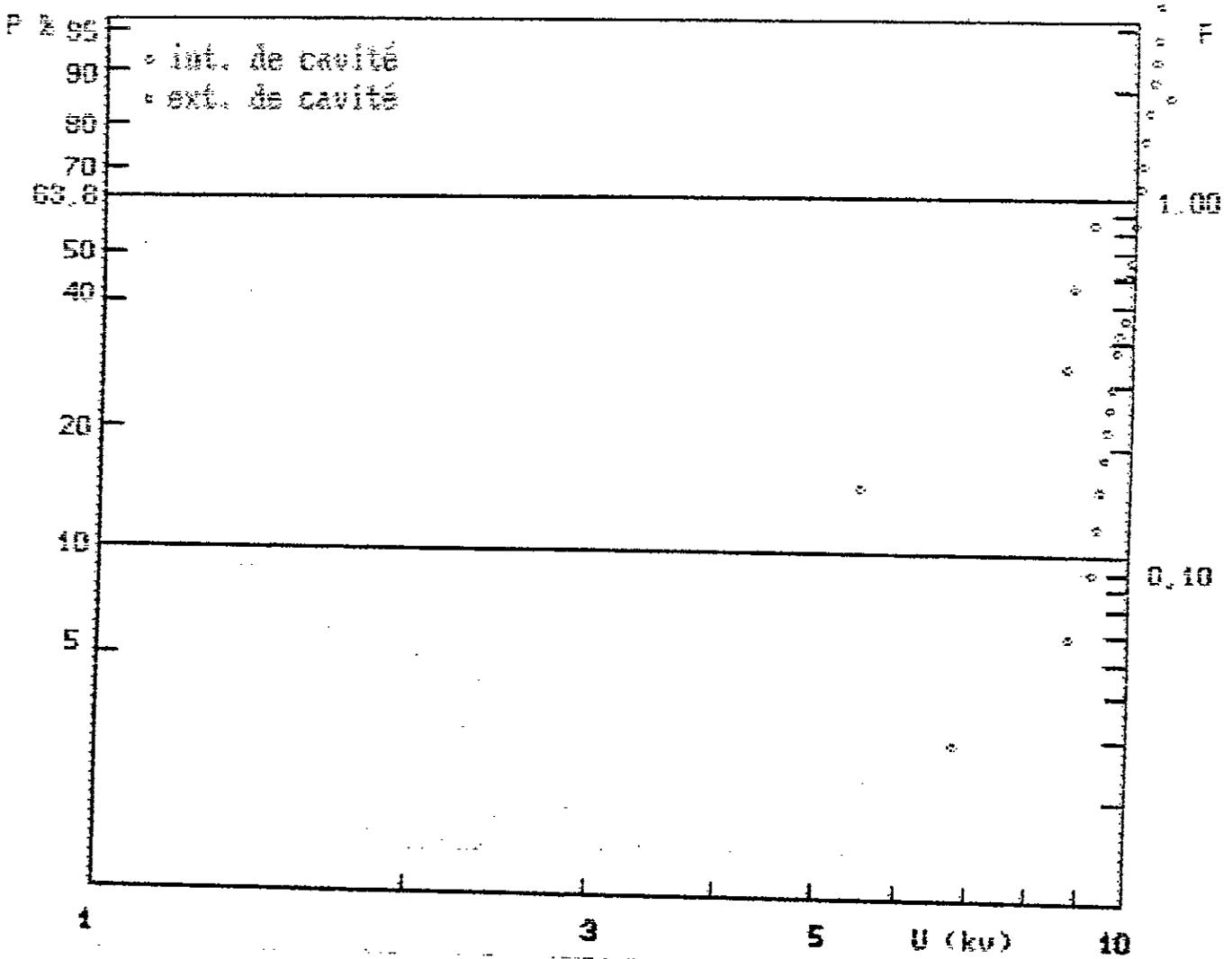


Figure II.8 Variation de la probabilité de claquage d'un film de PP en fonction de la tension.

l'avons mis en évidence lors de l'essai de vieillissement de modèles de condensateurs à 80°C et en présence d'oxygène [15].

Conclusion:

Dans les modèles de condensateurs étudiés, en l'absence de cavité, les décharges sont observées en bordure d'électrode comme le laissait prévoir le renforcement du champ électrique dans cette partie du condensateur. La présence d'une poche de liquide d'épaisseur égale ou supérieure à l'épaisseur du diélectrique, diminue sensiblement la tension d'apparition des décharges entraînant une dégradation prématurée du matériau au voisinage de cette poche. L'action d'une cavité de liquide est d'autant plus néfaste qu'elle est située au contact de l'électrode portée à la haute tension.

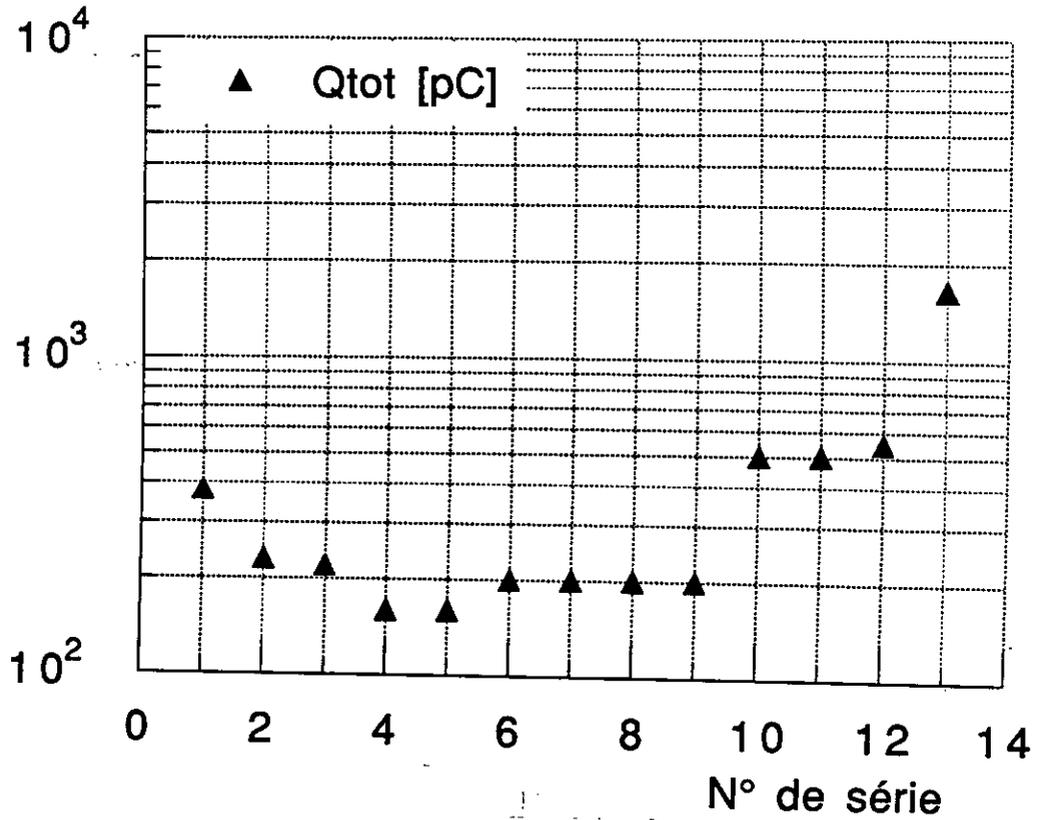


Figure II.9 Variation de la charge apparente totale au cours de la dégradation sous décharges d'un modèle de condensateur muni d'une cavité.

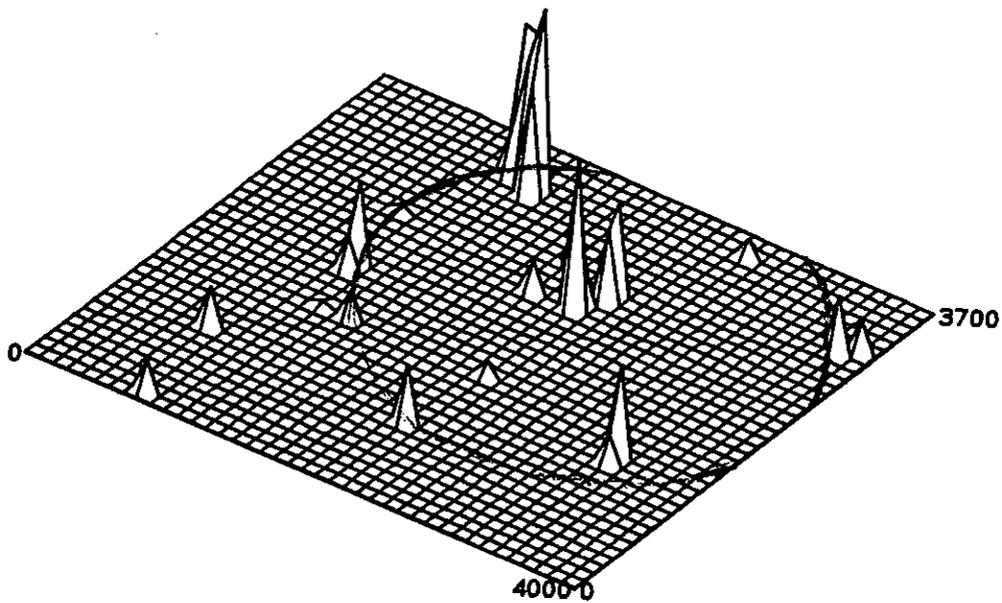


Figure II.10: Représentation 3D de l'intensité du pic d'absorption à 1018 cm^{-1} par rapport au pic à 1065 cm^{-1} .

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Bezborodko, O. Lesaint and R. Tobazéon
Study of partial discharges and gassing phenomena within gaseous cavities in insulating liquids.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol.27, No.2, April 1992.

- [2] P. Gazzana Priaroggia and G. Palandri
Research on the electric breakdown of fully impregnated paper insulation for high voltage cables.
AIEE Trans. february 1956, p. 1343.

- [3] J.R. Laghari, A. N. Hammoud and W.J. Sarjeant
Time-induced partial discharge breakdown in laminate structures.
IEEE Conf. on Elec. Insul. and Dielec. Phen. (1985) p. 518-523.

- [4] D.D. Chang, T.S. Sudarshan and J.E. Thompson
Analysis of electric stress distribution in cavities embedded within dielectric structures.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. EI-21 No.2, p. 213-219; April 1986.

- [5] N.H. Malik, A.A. Al-Arainy, A.M. Kailani and M.J. Khan
Discharge inception voltages due to voids in power cables.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. EI-22 No.6, p. 787-793; December 1987.

- [6] G. Robinson
Analysis of discharge spectra for cavities in impregnated paper insulation under AC stress.
Proceed. of the Conf. on Dielec. Mater. Measur. and Appli. p. 215-218; du 27 au 30 juin 1988.

- [7] F. H. Kreuger
Partial discharge in high-voltage equipment
Butterworths et Co Ltd (1989).

- [8] M. G. Danikas
Discharges in polymers.
3rd Inter. Conf. on Polym. Insul. Pow. Cables; 24 - 28 juin 1991 (France).
- [9] M. G. Danikas and A.M. Bruning
Comparison of several theoretical sub-corona to corona transition relations.
IEEE Inst. Symp. on Elec. Insul. Baltimore (USA) june 1992.
- [10] G.C. Crichton, P.W. Karlson and A. Pedersen
Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. EI-24 No.2, p. 335-342 (1989).
- [11] J.H. Mason
Discharges.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. EI-13 No.4, August 1978.
- [12] S. Chniba
Etudes mécanismes de claquage de films de polypropylène dans différents milieux ambiants.
Thèse de Doctorat 3è cycle Grenoble 1984.
- [13] C. Brosseau
Etude expérimentale de la conduction électrique et des phénomènes de claquage dans les imprégnants pour condensateurs en association avec des films de polypropylène.
Thèse de Doctorat de l'U.J.F. Grenoble 1989.
- [14] P. L. Levin, A. J. Hansen, D. Beatovic, H. Gan and J. H. Petrangelo
A unified boundary-element finite-element package.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol.23 No.2, August 1993.
- [15] B. Gosse, J.P. Gosse, S. Said, A. Gadoum and M. Nemamcha
Electrical degradation of polypropylene: A study by FTIR microspectroscopy.
J. of Appl. Polym. Sc., Vol. 46, 1121-1124 (1992).

CHAPITRE 3

DECHARGES EN BORD D'ARMATURE DE CONDENSATEUR

Introduction:

Un condensateur industriel de moyenne tension (figure 1), est constitué d'un certain nombre d'éléments montés en série pour pouvoir supporter la tension appliquée et en parallèle pour atteindre la valeur de l'énergie réactive souhaitée. L'élément de base est un enroulement dans lequel alternent deux couches de diélectrique (film de polypropylène) et un film métallique [1]. L'armature métallique est un film d'aluminium de 5 μm d'épaisseur. Les espaces libres compris entre les différents films sont remplis de liquide diélectrique. Les films d'aluminium sont décalés par rapport aux films de PP alternativement d'un coté puis de l'autre, afin de permettre les connexions électriques. Leur extrémité située à l'intérieur de l'enroulement est généralement repliée sur elle-même, on augmente ainsi le rayon de courbure du bord d'armature, ce qui réduit le renforcement du champ électrique. Mais lors d'une surtension, le champ électrique fortement divergent au voisinage du bord d'armature peut atteindre plusieurs MV/cm, valeur supérieure au champ de claquage des liquides diélectriques. Les décharges qui se produisent ainsi en bord d'armature, apparaissent comme un phénomène inévitable lors de surtensions de manoeuvres ou accidentelles, et leur étude est d'une grande importance. Nous cherchons à caractériser ces décharges sur des modèles de condensateurs se rapprochant le plus possible des condensateurs industriels.

I. Modèle de condensateur :

Le condensateur d'étude présenté sur la figure 2 est constitué de deux films de PP de 13,6 μm entre lesquels est placé un film d'aluminium de 6 μm d'épaisseur et de dimension 4*15 mm. La haute tension est appliquée au film d'aluminium par l'intermédiaire d'un ressort. L'électrode supérieure est en verre conducteur permettant de mesurer la lumière émise. L'espace entre les films est rempli de liquide imprégnant (MBT ou n-décane). La capacité totale du condensateur ainsi constitué est environ 160 pF. Le protocole expérimental est identique à celui exposé au chapitre 1 de cette partie. Le condensateur d'étude est soumis à une tension croissante par palier de 300 V et d'une durée de 5 mn pendant laquelle nous procédons à l'acquisition des décharges.

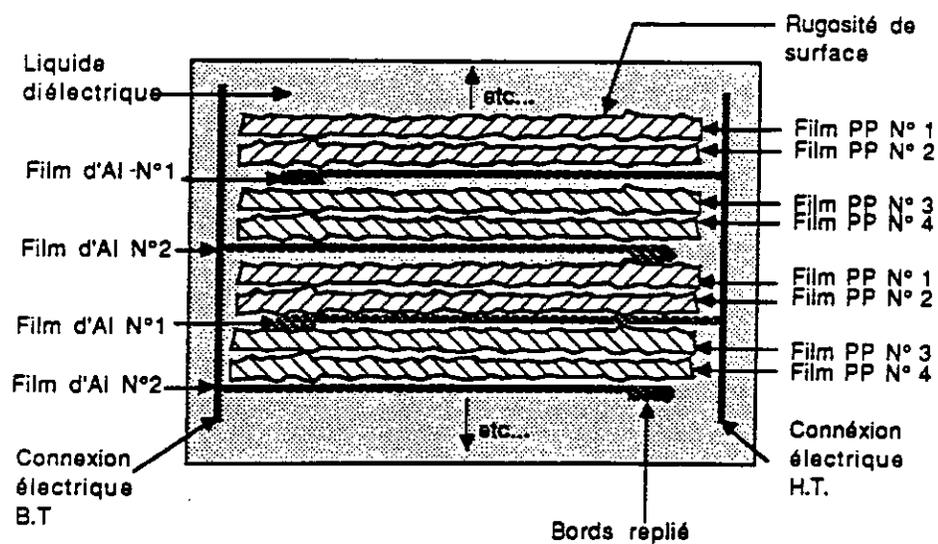


Figure 1: Coupe schématique d'une bobine de condensateur.

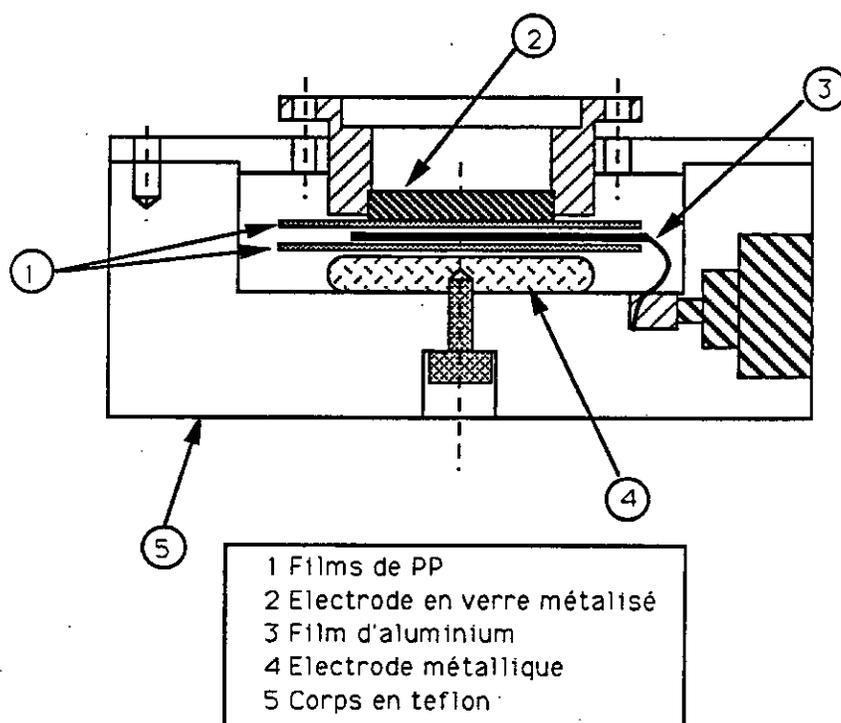


Figure 2: Schéma du modèle de bord d'armature de condensateur.

II. Résultats expérimentaux:

L'observation à l'aide du montage intensificateur d'image montre que les foyers de décharges sont situés autour de la languette d'aluminium et leur nombre augmente avec la tension.

II.1: Tension d'apparition des décharges:

Sur le tableau 1, nous donnons le résultat de mesures effectuées sur une dizaine d'échantillons imprégnés au MBT et au n-décane.

Tableau 1:

	Va [kV]	n-/n+ à V=Va	Qmax+ [pC]	Qmax- [pC]
MBT	2 ± 0,1	1 à 2	0,2 à 0,3	0,5 à 0,9
n-décane	2 ± 0,1	7 à 14	2 à 6	1 à 1,6

Dans ce tableau, Va est la tension d'apparition des décharges, n-/n+ le rapport du nombre de décharges négatives et positives à V=Va et Qmax+, Qmax- sont respectivement l'amplitude des décharges positives et négatives à V=Va. Dans ces modèles de condensateurs, la tension Va est la même pour les deux liquides et à cette tension, nous remarquons une prédominance du nombre de décharges négatives surtout en présence du n-décane. Les condensateurs imprégnés au n-décane sont source de décharges d'amplitude plus grande que ceux imprégnés au MBT. Ceci est conforme au résultat obtenu au chapitre 1. Le graphe de la variation de l'intensité lumineuse en fonction de la tension appliquée dans ces modèles de condensateur présente un changement de pente au voisinage de 2 kV, valeur égale à la tension Va. Sur des modèles de condensateur de géométrie analogue, Meyrueix [2] a montré que la tension de génération de gaz en présence de phénylxylyléthane (PXE) et de néocaprâte de benzyle (BNC) était la même et égale à 2,1 - 2,5 kV, valeurs légèrement supérieures aux tensions Va que nous déterminons. L'écart s'explique par la plus grande sensibilité de notre montage expérimental (0,2 pC au lieu de 1 pC en [2]).

II.2: Caractéristiques $n(\phi)$ et $q(\phi)$ des décharges:

Les paramètres statistiques des distributions $n(\phi)$ et $q(\phi)$ dans cette géométrie sont donnés dans le tableau 2 pour $V = V_a$.

Tableau 2

	Nombre		charge	
	positive	négative	positive	négative
Sk	1,05	0,59	1,8	-0,9
Ku	0,01	-0,49	3,1	0,78
Cc	0,21		0,1	
$P_0(\phi_{1+})$	70 à 90°			
$P_0(\phi_{1-})$	270°			

Ces distributions se caractérisent essentiellement par une forte asymétrie des décharges positives (Sk élevé) et par l'apparition des décharges au maximum de la tension.

II. 3: Influence du repli de l'extrémité du film d'Al:

Le repli de l'extrémité du film d'aluminium n'entraîne pas de modification de la nature des décharges (amplitude, nombre, distribution dans le cycle) mais permet de décaler la tension d'apparition des décharges à 2,4 - 2,7 kV. L'effet sur la tension d'apparition des décharges est quasiment équivalent à une doublure du rayon de courbure (r) du bord d'armature et vérifie la loi de variation de cette tension en $r^{1/2}$ (chap. I, partie I). La même influence du repli a été observée sur la tension de génération de gaz dans des modèles de condensateurs analogues [2].

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons montré que l'apparition des décharges a lieu à un niveau de tension inférieur à la tension de génération de gaz dans des modèles de condensateur simulant un bord d'armature. L'apparition des décharges semble donc être une phase précédant la formation de gaz. Dans ces modèles, à géométrie très divergente, la nature du liquide imprégnant ne semble pas être un facteur très influent sur la tension d'apparition des décharges. Par contre elle intervient sur l'amplitude des décharges, et donc sur les dommages causés par ces décharges.

Bibliographie:

- [1] R. Fournie
Les isolants en électrotechnique: essais, mécanismes de dégradation et application industrielle.
Editions Eyrolles, Paris 1990.

- [2] R. Meyrueix
Etude de la génération et du comportement d'une phase gazeuse dans un liquide diélectrique soumis à un champ électrique.
Thèse de Docteur-Ingénieur; INPG Grenoble 1980.

CHAPITRE 4

**IDENTIFICATION DES SOURCES DE
DECHARGES**

Introduction:

L'identification défaut générant les décharges à partir d'une ou plusieurs grandeurs mesurées, a toujours été une préoccupation des constructeurs et exploitants d'appareillage à haute tension. En 1969, un modèle d'identification des décharges, basé sur l'analyse de la réponse du détecteur (diagramme de décharge à l'oscilloscope) et la variation de l'amplitude des décharges en fonction de la tension et dans le temps, a été présenté à la CIGRE [1]. Ce modèle ne permettait d'identifier d'une manière nette que certains cas où la dissymétrie est très prononcée, par exemple le cas d'une ou plusieurs cavités au contact d'une électrode métallique, ou encore le cas où les décharges sont régulières en fréquence et en amplitude (pointe / plan par exemple). Pour tous les autres cas examinés, les distributions sont très semblables et ce modèle devient insuffisant pour la reconnaissance d'une source unique de décharges. D'autres modèles plus récents, associant les grandeurs mesurées (charge, fréquence) et l'analyse des distributions $n(f)$ et $q(f)$ ont été mis au point. Ces modèles consistent à comparer les caractéristiques des décharges dans un échantillon présentant un défaut inconnu aux valeurs relatives à des échantillons de référence [2, 3, 4, 5]. Les grandeurs comparées sont les paramètres statistiques S_k et K_u des distributions $n(\phi)$ et $q(\phi)$ que nous avons définis précédemment. Si l'approche statistique des décharges, inhérent à la physique même du phénomène, semble être bien admise, l'utilisation des paramètres S_k et K_u qui caractérisent la forme d'une distribution statistique par rapport à une distribution normale, ne semble pas évidente à première vue. Dans cette partie de notre étude, nous cherchons à vérifier la validité de ces modèles à partir de nos résultats expérimentaux.

I. Synthèse des décharges dans différentes configurations:

Comme nous venons de le montrer dans les chapitres I, II, et III de cette partie de l'étude, chaque configuration peut être caractérisée par un certain type de décharges. Sur les tableaux 1, 2, 3, et 4, nous donnons la synthèse des résultats expérimentaux obtenus sur 12 configurations qui diffèrent soit par leur géométrie soit par l'environnement dans lequel les décharges ont eu lieu. Chaque configuration est caractérisée par 16 grandeurs mesurées ou calculées à $V=V_a$, valeur indiquée dans les tableaux. Ces grandeurs ont été définies dans la partie expérimentale de cette étude et peuvent être classées en deux groupes A et B. Le groupe A correspond aux grandeurs mesurées: g_1, g_2, g_{15} et g_{16} et le groupe B aux grandeurs statistiques des distributions: de g_3 à g_{14} . Comme nous l'avons remarqué dans la première partie de

cette étude, les grandeurs caractéristiques des décharges sont des grandeurs apparentes qui dépendent de la tension appliquée et de la géométrie de la configuration, d'où l'intérêt de comparer les rapports des charges à $V=V_a$ et non leur valeurs absolues. Ces grandeurs serviront comme référence dans le protocole d'identification des sources de décharges.

Tableau 1

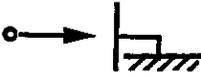
	n° de config.	1	2	3
	schéma de la configuration			
	conditions expérimentales	pointe/plan dans l'air	pointe/plan avec une cale isolante	cale au contact de la pointe
	V_a [kV]	2,1	2,5	1,6
1	$n+/n-$	0,004	0,9	0,9
2	q_{max+}/q_{max-}	0,001	4,3	0,44
3	Sk_{n+}		0,36	0,56
4	Ku_{n+}		-1,2	-0,42
5	Sk_{n-}	0,12	0,42	2,8
6	Ku_{n-}	-1,26	-1,45	7,9
7	Cc_n		0,91	0,029
8	Sk_{n+}		-1,2	-0,57
9	Ku_{n+}		2,1	-0,84
10	Sk_{n-}	-1,01	-0,8	-0,5
11	Ku_{n-}	-0,009	-0,38	-1,07
12	Cc_n		0,27	0,53
13	$P0(\phi_{1+})$		90°	70-80°
14	$P0(\phi_{1-})$	260-270°	270°	210-220°
15	$P0(q+)/P0(q-)$	0,004	1,5	1,07
16	$P0(q_{1+})/P0(q_{1-})$	0,004	4	1,07

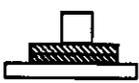
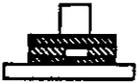
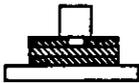
Tableau 2

	n° de config.	4	5
	schéma de config		
	Conditions expérimentales	sphère/plan dans l'air	sphère/plan dans n-décane
	Va [kV]	0,5	2
1	n+/n-	7,5	1,04
2	q _{max} +/q _{max} -	1	0,92
3	Sk _{n+}	0,37	1,6
4	Ku _{n+}	-0,75	2,7
5	Sk _{n-}	0,7	1,8
6	Ku _{n-}	-0,3	2,9
7	Cc _n	0,3	0,67
8	Sk _{a+}	0,5	1,2
9	Ku _{a+}	-0,3	2,8
10	Sk _{a-}	-0,56	0,8
11	Ku _{a-}	-1,56	0,56
12	Cc _a	0,11	0,22
13	P0(φ ₁ +))	0-5°	5-10°
14	P0(φ ₁ -)	270°	180°
15	P0(q ₊)/P0(q ₋)		0,55
16	P0(q ₁ +)/P0(q ₁ -)	0,05	0,6

Tableau 3

	n° de config.	6	7
	schéma de config		
	Conditions expérimentales	Plan/plan dans l'air	cavité dans l'air
	Va [kV]	0,8	0,56
1	n+/n-	4,2	0,9
2	q _{max+} /q _{max-}	0,77	1,03
3	Sk _{n+}	-0,06	0,36
4	Ku _{n+}	-1,2	-1,09
5	Sk _{n-}	0,88	0,44
6	Ku _{n-}	0,25	-0,27
7	Cc _n	0,56	0,7
8	Sk _{n+}	0,78	0,13
9	Ku _{n+}	1,42	-0,38
10	Sk _{n-}	1,14	-0,11
11	Ku _{n-}	1,87	-0,05
12	Cc _n	0,14	0,56
13	P0(φ ₁₊)	15-30°	40°
14	P0(φ ₁₋)	220-240°	210°
15	P0(q ₊)/P0(q ₋)	0,16	0,66
16	P0(q ₁₊)/P0(q ₁₋)	0,16	1

Tableau 4

	n° de config.	8	9	10	11	12
	schéma de config					
	Conditions expérimentales	plan/plan dans n-décane	cavité dans n-décane	cavité coté HT	cavité coté masse	bord armature
	Va [kV]	4,5	5,1	3,3	3,9	1,8
1	n+/n-	0,67	0,65	0,03	0,67	0,14
2	q _{max+} /q _{max-}	10,6	0,83	1,5	2	1,33
3	Sk _{n+}	0,94	0,57		1,7	1,05
4	Ku _{n+}	-0,037	-0,5		2,3	0,01
5	Sk _{n-}	0,64	0,5	0,38	1,6	0,59
6	Ku _{n-}	-0,42	-0,86	-1,03	2,6	-0,49
7	Cc _n	0,54	0,53		0,31	0,21
8	Sk _{a+}	5,5	-0,78		2	1,8
9	Ku _{a+}	25	-0,19		3,4	3,1
10	Sk _{a-}	-2,2	-1,4	0,2	0,6	-0,9
11	Ku _{a-}	6,4	0,41	-0,2	-0,9	0,78
12	Cc _n	0,12	0,11			0,1
13	P0(φ ₁₊)	70-80°	30-40°		80°	70-90°
14	P0(φ ₁₋)	260-270°	220°	270°	260-270°	270°
15	P0(q ₊)/P0(q ₋)	1,4	0,5		0,5	1,5
16	P0(q ₁₊)/P0(q ₁₋)	1,4	0,5		0,5	1,3

Il ressort des tableaux précédents les tendances suivantes:

a) A partir du rapport $n+/n-$, nous remarquons que les configurations 1, 10 et 12 (correspondant à des décharges en pointe/plan dans l'air, dans une cavité de liquide placée du côté de la HT ou en bord d'armature dans un liquide), possèdent une dominance de décharges négatives, les décharges dans les configurations 4 et 6 sont essentiellement positives et dans les autres configurations il y a un équilibre entre les deux types.

b) L'examen des phases les plus probables d'apparition des décharges montre que les configurations sont de trois types: Celles où les décharges apparaissent au maximum de la tension appliquée: 1, 2, 8, 10, 11, 12; celles où elles apparaissent au passage par zéro de la tension (c'est le cas des décharges en géométrie sphère/plan dans l'air et dans le liquide (4 et 5)) et enfin celles qui apparaissent avec une avance de phase de 40 à 50° par rapport au maximum de la tension (3, 6, 7, 9).

c) Les paramètres statistiques sont très dispersés mais on peut remarquer qu'il existe une assez bonne corrélation linéaire ($C_c = 0,5$ à $0,9$) entre la distribution du nombre de décharges positives et négatives. Cette corrélation est très faible entre les distributions des charges apparentes positives et négatives.

II. Protocole d'identification:

Soit à identifier un défaut x dont les décharges sont définies par leurs grandeurs caractéristiques $g_{1x}, g_{2x}, \dots, g_{16x}$. On cherche par comparaisons successives de ces grandeurs aux grandeurs de référence relatives aux configurations types 1, 2, ..., 12, le type de défaut pouvant être apparenté au défaut inconnu x . Pour cela nous calculons les écarts relatifs entre les grandeurs correspondantes. Ces écarts forment une matrice à 16 lignes et 12 colonnes:

$$\begin{array}{cccccc} \delta g_{11x} & \delta g_{12x} & \cdot & \cdot & \delta g_{112x} \\ \delta g_{21x} & \delta g_{22x} & \cdot & \cdot & \delta g_{212x} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \delta g_{161x} & \delta g_{162x} & \cdot & \cdot & \delta g_{1612x} \end{array}$$

Dans cette matrice, à titre d'exemple, δg_{11x} est l'écart relatif entre la grandeur g_1 ($n+/n-$) de la configuration 1 et la grandeur correspondante (g_1) du défaut x . Le défaut le plus probable est celui qui correspond au minimum des écarts dans deux groupes A et B du modèle.

III. Exemple d'identification:

Deux défauts différents ont été introduits dans des dispositifs industriels à HT dont le SF6 est le diélectrique (fabriqués par Merlin Gerin). On cherche à retrouver l'identité du défaut inclus dans ces dispositifs.

Dans un premier dispositif, des particules de limaille de fer mélangées à une graisse ont été placées au voisinage de la traversée HT. Ce dispositif est schématisé sur la figure IV.1.

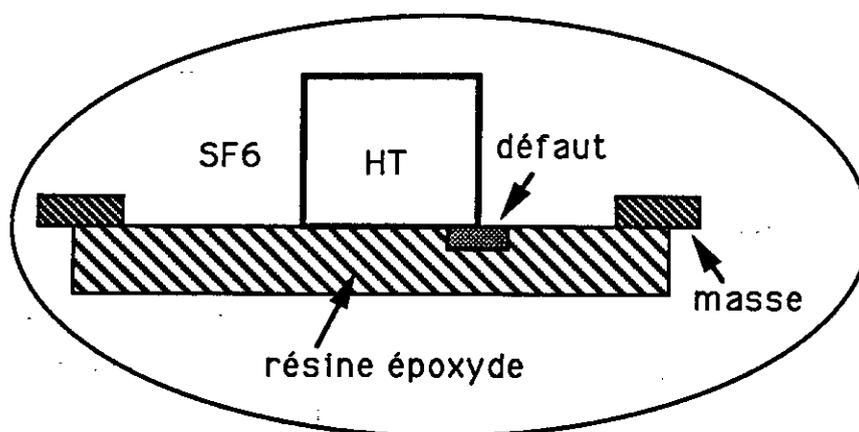


Figure IV.1: Schéma du dispositif de test du modèle d'identification

Dans ce dispositif, les décharges apparaissent à $V=10$ kV. Par comparaison des grandeurs caractéristiques des décharges mesurées à cette tension avec celles relatives au modèle d'identification, nous remarquons que:

Au vu des grandeurs de type A (grandeurs mesurées), les décharges sont semblables à celles mesurées dans les configurations 4 et 5;

D'après les grandeurs de type B (grandeurs statistiques), ces décharges sont analogues à celles dans les configurations 3 et 5.

Il apparaît donc d'après notre modèle d'identification, que les décharges dans ce dispositif s'apparentent à des décharges superficielles dans un environnement liquide ou gazeux (sphère ou pointe au contact d'un film isolant).

Dans un deuxième dispositif, on dispose d'une arête vive à l'interface métal/isolant (décollement en couronne). Les décharges mesurées à $V = 28$ kV dans ce cas, ressemblent à des décharges causées par une pointe métallique placée à une

certaine distance de l'isolant ou à des décharges dans des vacuoles gazeuses ou liquide au milieu du diélectrique (configurations 2, 7 et 9).

Discussion et conclusion:

Le modèle d'identification des décharges, malgré sa faible précision, semble être prometteur et mérite un perfectionnement. Son amélioration doit se faire d'abord par l'introduction d'autres grandeurs caractéristiques des décharges (comme les paramètres statistiques conditionnels) et l'élargissement de sa banque de données à d'autres configurations type de géométrie contrôlée, ce qui permettrait d'identifier en plus de la nature du défaut, sa taille. Si la taille du défaut constitue un indice précieux de l'évolution de l'état de l'isolation, elle permet aussi d'accéder à la charge réelle des décharges, grandeur liée directement à la dégradation du matériau.

Bibliographie:

- [1] Rapport CIGRE
Electra, N° 11, pp. 60-98, (1969).

- [2] E. GULSKI, P.H.F. MORSHUIS and F.H.KREUGER
Automatized recognition of partial discharges in cavities.
Jap. J. of Appl. Phys. vol.29; nb7, july 1990 pp. 1329-1335.

- [3] E. GULSKI and F.H.KREUGER
Recognition of discharges sources using statistical tools.
Proc. of the 3rd Int. Conf. on Prop. and Appl. of Diel. Mat. July 8-12, 1991
Tokyo.

- [4] E. GULSKI and F.H.KREUGER
Diagnostics of insulating using statistical tools.
Conf. Rec. of the 1992 IEEE Int. Symp. on Elec. Insul. Baltimore (USA)
june 7-10, 1992.

- [5] H. G. KRANZ and R. KRUMP
Partial discharge diagnosis using statistical optimization on a PC-based
system.
IEEE Trans. on Elec. Insul. vol. 27, N° 1, February 1992.

TROISIEME PARTIE

***DEGRADATION SOUS DECHARGES
DU POLYPROPYLENE IMPREGNE***

Introduction:

La dégradation des films isolants sous l'action des décharges a surtout été étudiée dans un environnement gazeux comme l'air, O₂, He, Ar [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] en suivant l'évolution d'une grandeur pouvant être corrélée à un niveau de dégradation du matériau soumis à des décharges. La dégradation d'une isolation sous décharges peut être modélisée par le schéma général de la figure 1 [8]. Ce schéma montre les différentes sources de décharges dans une isolation et leurs effets sur l'évolution des propriétés de cette isolation. Nous remarquons que l'action des décharges peut conduire soit à la formation de produits inhibiteurs de décharges (auto-extinction des décharges), soit à la défaillance totale ou partielle de l'isolation par échauffement excessif ou par formation d'un défaut (craquelure, arborescence) dépassant une taille critique.

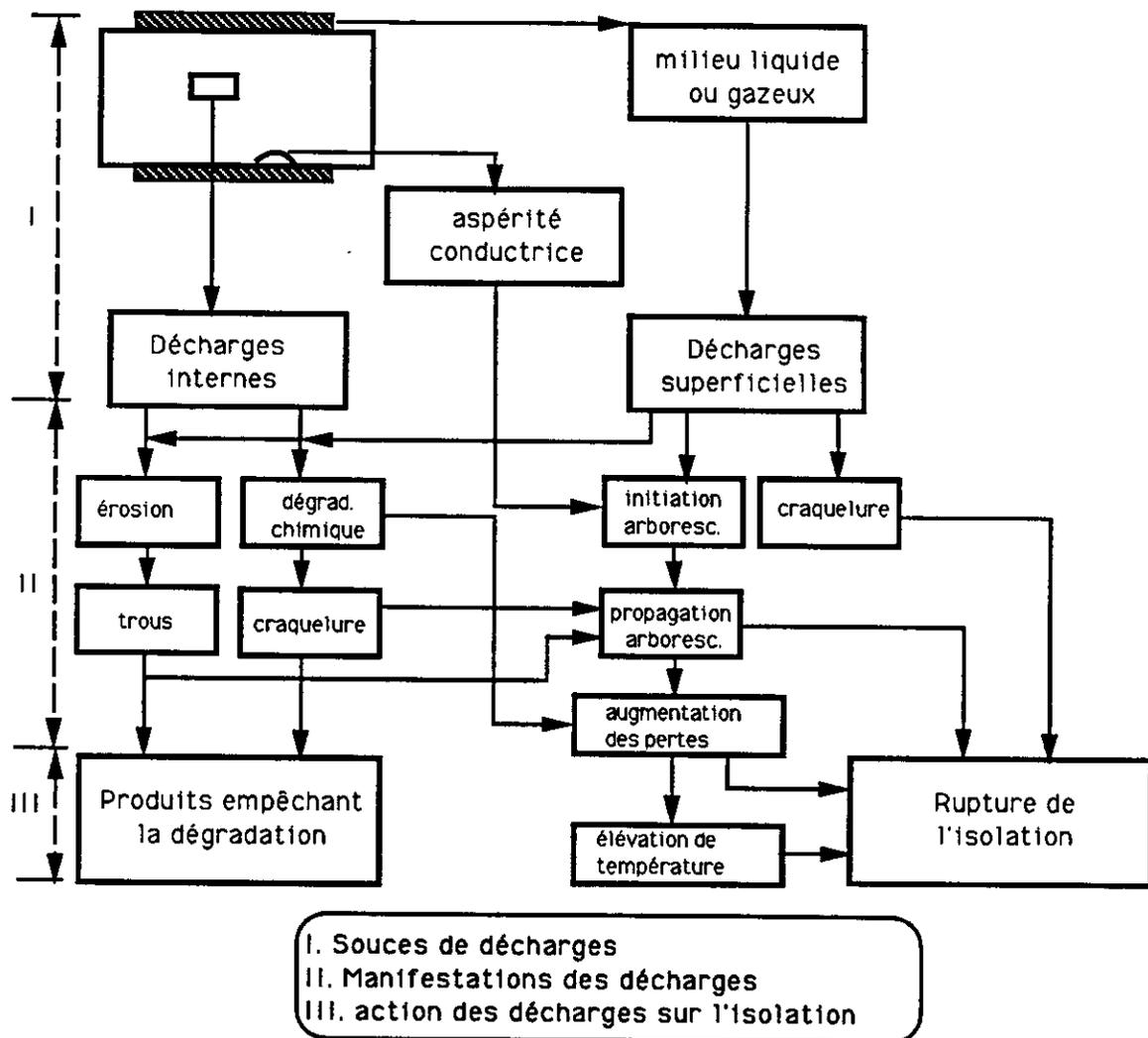


Figure 1: Schéma général de dégradation d'une isolation sous décharges [8].

Différentes techniques d'analyse ont été employées, comme la chromatographie en phase gazeuse pour déterminer la nature et la quantité de gaz produits par les décharges associée à la mesure d'une grandeur électrique caractéristique des décharges (charge apparente, énergie) [1, 2, 4, 9] et l'analyse par spectroscopie de la modification de la structure de surface des polymères pour identifier les produits formés au cours de la dégradation [3, 6]. La microscopie ou la visualisation à l'aide d'un photomultiplicateur ont souvent été associées à d'autres techniques pour suivre l'évolution des propriétés du matériau au cours de la dégradation [3, 10, 11, 12].

Peu de travaux ont été effectués sur la dégradation sous décharges de polymères imprégnés où les grandeurs caractéristiques des décharges dépendent beaucoup de la nature du couple solide / liquide et possèdent un aspect stochastique très marqué. Il a été observé qu'en géométrie divergente pointe / plan, il existe une corrélation entre l'énergie apparente totale des décharges et l'étendue dégradée de film de polyéthylène imprégné d'huile minérale [10, 11]. Dans des condensateurs de puissance au papier imprégné d'huile, il a été montré que l'analyse des gaz dissous dans l'huile peut constituer un indice de diagnostic de ces condensateurs [9]. S'il est certain que les décharges constituent une cause majeure de dégradation des isolations, l'évaluation de leur action reste très qualitative.

Dans la première partie de ce travail, nous avons montré que dans des modèles de condensateur au polypropylène imprégné, l'action des décharges en bord d'armature (zone de champ renforcé) n'est pas uniforme (plusieurs foyers de décharges pouvant agir simultanément) et son évaluation est très difficile. Pour mieux cerner cette action et comprendre les mécanismes de dégradation des films de polypropylène (PP) sous décharges, nous avons choisi une géométrie dans laquelle le film est placé entre sphère et plan et la zone où apparaissent les décharges est plus localisée. Dans cette géométrie, nous mesurons les caractéristiques des décharges et la modification de la rigidité diélectrique des films de PP imprégnés au benzyltoluène (BT) avec et sans époxyde. Nous analysons aussi par spectroscopie IRTF les produits de dégradation de ces films.

Techniques expérimentales:

L'échantillon d'étude est constitué d'un film rugueux de polypropylène isotactique (95%) de 13,6 μm d'épaisseur placé entre une sphère en acier inox de 2,5 mm de diamètre et un plan. L'ensemble sphère / film est plongé dans le benzyltoluène au cours de l'expérimentation. Nous appliquons une tension alternative de 2 kVeff (50

Hz), valeur légèrement supérieure à la tension d'apparition des décharges pendant 30 mn et nous procédons à l'acquisition des décharges à l'aide du dispositif que nous avons décrit dans la première partie de la présente étude.

Résultats expérimentaux:

1. Description du régime de décharges:

a) Décharges en fonction de la tension:

La tension d'apparition des décharges (V_a) dans cette géométrie est égale à 1,6 kV \pm 10%. Pour $V > V_a$, le nombre de décharges et leur amplitude augmentent comme le montre l'évolution de la distribution dans le cycle du nombre de décharges (a) et de la charge apparente moyenne (b) pour des tensions comprises entre 1,6 kV et 2,4 kV (Fig. 2). Pour chaque valeur de tension, l'acquisition des décharges a eu lieu pendant 10 mn. La fréquence moyenne des décharges passe de $0,1 \text{ s}^{-1}$ pour $V = V_a$ à 2 s^{-1} pour $V = 1,5 V_a$, de même que la charge apparente maximale (Q_M) passe de 0,6 pC à 2 pC pour les mêmes tensions et la charge moyenne (Q_m) reste pratiquement constante et égale à 0,5 pC. Pour $V > 2,4 \text{ kV}$, la fréquence des décharges dépasse la fréquence limite de détection de l'appareillage, d'où le choix de la tension de 2 kV comme valeur à laquelle nous faisons dégrader les échantillons. Nous observons parfois un régime de fortes décharges ($> 30 \text{ pC}$) qui engendre une dégradation plus marquée du film de PP et conduit à son claquage en quelques minutes. Ce régime est probablement en rapport avec la formation et l'expansion d'une phase gazeuse, ce qui devrait être confirmé par des essais futurs. Dans la présente étude, nous nous intéressons uniquement au régime de dégradation sous décharges de faible amplitude.

b) Caractéristiques des décharges à 2 kVeff:

Les décharges produites dans la géométrie sphère / plan choisie sont caractérisées par leurs distributions dans le cycle. Ces distributions représentent le nombre de décharges ou la charge apparente moyenne en fonction de la phase. Sur la figure 3, nous donnons un exemple de la distribution du nombre de décharges (a) et de la charge apparente (b) dans le cycle. Nous remarquons que cette distribution se caractérise par des décharges qui apparaissent au voisinage du passage par zéro de la tension. Dans cet exemple, en 10 mn d'application de la tension, il y a eu au maximum 25 décharges dans une phase et la charge apparente moyenne par phase

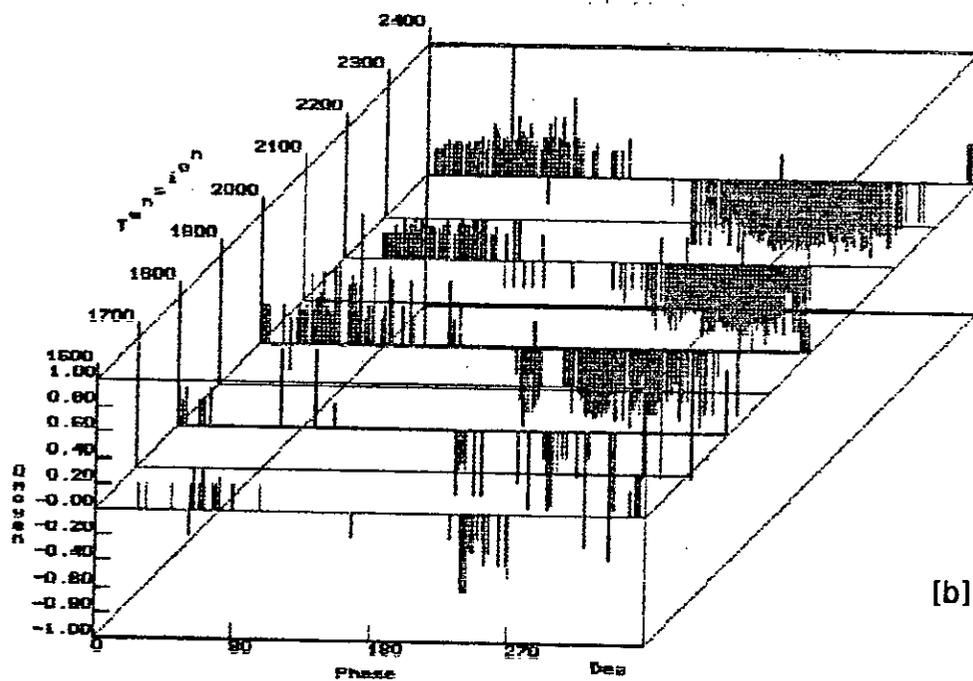
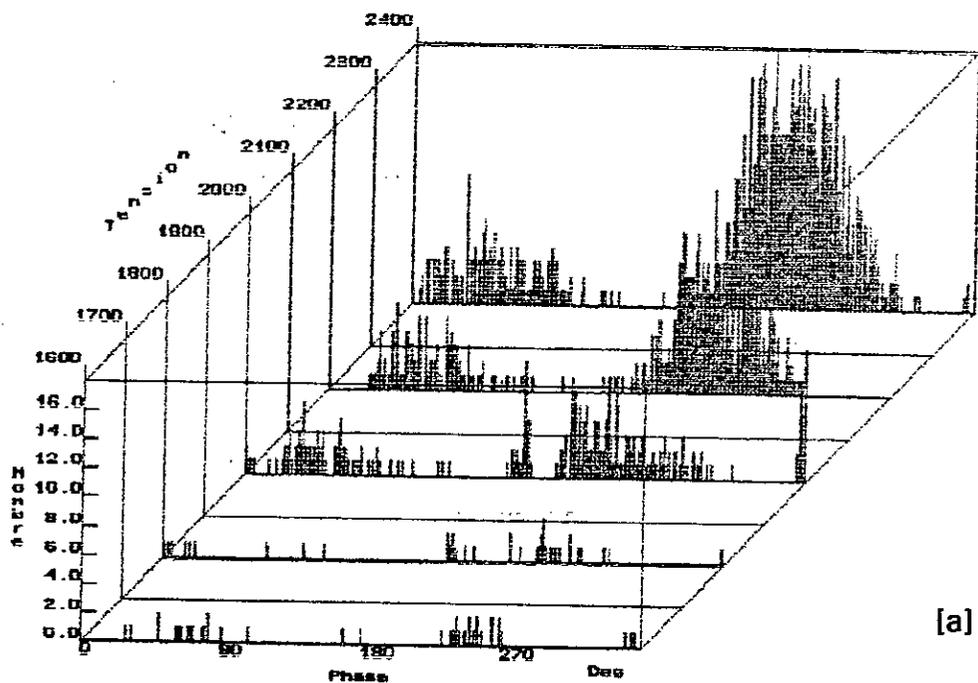


Figure 2: Variation du nombre de décharges (a) et de la charge moyenne (b) en fonction de la phase (ϕ) et de la tension appliquée.

atteint 4 pC. Dans le tableau 1, nous donnons les valeurs les plus probables de la charge apparente positive et négative [$P_0(q^+)$, $P_0(q^-)$] et des phases d'initiation des premières décharges [$P_0(\phi^+)$, $P_0(\phi^-)$] quand le film de PP est imprégné de BT avec ou sans époxyde.

Tableau 1

	$P_0(q^+)$ [pC]	$P_0(q^-)$ [pC]	$P_0(\phi^+)$ [°]	$P_0(\phi^-)$ [°]	Q_M [pC]
BT	1,5	1,5	10 - 25	180 - 200	1 - 2
BT + époxyde	0,6	1,0	10 - 25	180 - 200	5 - 40

Pour caractériser ces distributions, nous calculons les paramètres statistiques Sk et Ku ainsi que le coefficient de corrélation linéaire Cc entre les distributions des décharges positives et négatives. Sur le tableau 2, nous donnons les paramètres relatifs à cette géométrie.

Tableau 2

	$n(\phi)$		$q(\phi)$	
	$n_+(\phi)$	$n_-(\phi)$	$q_+(\phi)$	$q_-(\phi)$
Sk	0,9 à 1,5	0,9 à 1,5	< 1	< 1
Ku	> 0	> 0	< 0	< 0
Cc	0,7 à 0,9		0,3 à 0,8	

Nous constatons que la distribution du nombre de décharges possède une importante asymétrie à gauche par rapport à une distribution normale c'est-à-dire que le plus grand nombre de décharges apparaissent à faible tension. La distribution de la charge apparente possède aussi une asymétrie à gauche mais moins prononcée. Le coefficient de planitude (Ku) possède une grande fluctuation due à sa sensibilité puisqu'il représente un moment d'ordre 4. Dans cette géométrie, la distribution du nombre de décharges est plus aplatie qu'une distribution normale ($Ku > 0$), par contre la distribution de la charge apparente est plus pointue qu'une distribution normale. Il existe une bonne corrélation linéaire (0,7 à 0,9) entre la distribution du nombre de décharges positives et négatives et une corrélation très fluctuante et souvent très faible entre les distributions des charges apparentes positives et négatives. Nous comparons ces paramètres à ceux calculés pour des distributions

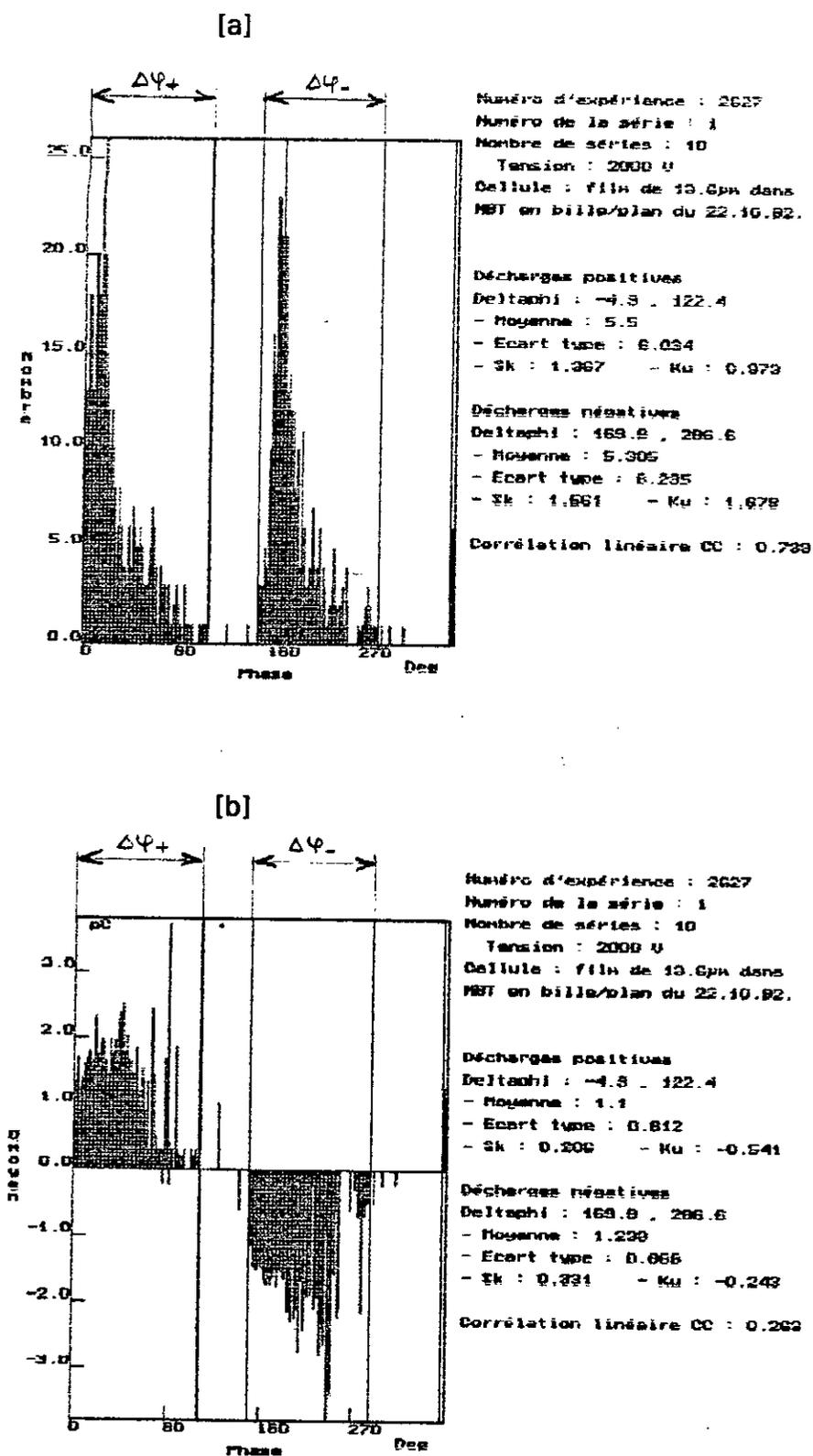


Figure 3: Variation du nombre de décharges (a) et de la charge moyenne (b) en fonction de la phase (ϕ).

de décharges superficielles mesurées dans l'air et dans l'huile de transformateur [13] (tableau 3).

Tableau 3

		n(ϕ)		q (ϕ)	
		n ₊ (ϕ)	n ₋ (ϕ)	q ₊ (ϕ)	q ₋ (ϕ)
Sk	air	0,7	0,5	0,1	0,05
	huile	-0,15	0,05	0,05	0,05
Ku	air	0,35	-0,1	-0,8	-0,8
	huile	-0,45	-0,35	-0,45	-0,55

Nous remarquons que les décharges en géométrie sphère/plan s'apparentent assez bien aux décharges superficielles dans l'air ou dans l'huile de transformateur. La différence peut provenir du fait que nous calculons ces coefficients uniquement sur des intervalles de phase $\delta\phi_+$ et $\delta\phi_-$ (fig. 3) où existent effectivement des décharges et non sur toute la demi-période. Le coefficient de corrélation est calculé sur le plus grand des intervalles $\delta\phi_+$ ou $\delta\phi_-$.

c) Evolution des décharges dans le temps:

Quand on applique une tension de 2 kV pendant 30 mn à un échantillon imprégné de BT, la fréquence moyenne des décharges et la charge apparente moyenne restent quasiment constantes. Un film de PP imprégné de BT+époxyde soumis à la même tension est sujet à des décharges dont les distributions n(ϕ) et q(ϕ) sont semblables mais de caractéristiques très différentes. La fréquence moyenne des décharges et la charge apparente maximale sont plus élevées (tableau 1), mais la charge moyenne reste du même ordre de grandeur.

2. Abaissement de la rigidité diélectrique du film de PP:

Après que le film de 13,6 μm ait été soumis à une tension de 2 kV pendant 30 mn, nous mesurons sa tension de claquage sous rampe de tension continue de 500 V/s. On répète la même opération en d'autres points du film qui doivent être suffisamment éloignés. Sur le tableau 4, nous donnons les résultats de test sur plusieurs échantillons avec et sans époxyde.

Tableau 4

	Σq [nC]	V_c [kV]	δV_c [%]
BT	1	5,5	39
BT + époxyde	10	7	22

Sur ce tableau nous avons porté la charge apparente totale (Σq) transférée à l'échantillon au cours de la dégradation, sa tension de claquage (V_c) et son abaissement relatif (δV_c) par rapport à la tension moyenne de claquage d'un film neuf (9 kV). Nous remarquons que l'adjonction de l'époxyde entraîne l'apparition de décharges de fréquence et d'amplitude plus élevées mais l'abaissement de la rigidité diélectrique du film de PP est moindre.

Dans le cas où apparaissent les décharges de grandes amplitudes dans le BT ($\Sigma q > 30$ nC), δV_c peut dépasser 60%. Il semble donc que la charge apparente totale représente une image de la contrainte à laquelle a été soumis le matériau et donne un état général de sa dégradation.

3. Analyse des films de PP par IRTF:

L'analyse par IRTF des films de $13,6 \mu\text{m}$ est fortement gênée par la formation de franges d'interférence dues à l'épaisseur du film. C'est pourquoi nous étudions l'action des décharges sur des films plus épais ($65 \mu\text{m}$), soumis à une tension de 8 kVeff pendant 3 heures dans la même géométrie que précédemment. L'analyse par microscopie IRTF de ces films montre que:

Pour des films imprégnés au BT, soumis à un régime de décharges de faible amplitude (charge totale < 10 nC), nous observons une dégradation non homogène, localisée autour de la bille à une distance $< 1\text{mm}$ du centre de la sphère (fig.4a). Cette dégradation se manifeste par un pic d'absorption à 1020 cm^{-1} , auquel est souvent associé un autre pic à 670 cm^{-1} , caractéristique d'une liaison C=C ou C-O-C. Cette bande est caractéristique d'une attaque radicalaire du polypropylène [14].

Les films imprégnés au BT + époxyde soumis à une charge totale de 80 nC présentent une dégradation nettement moins importante. Le pic d'absorption à 1020 cm^{-1} est moins important et souvent inexistant, mais il apparaît un pic à 874 cm^{-1} situé 0,2 mm du centre de la sphère (fig.4b). Ce pic est caractéristique d'un

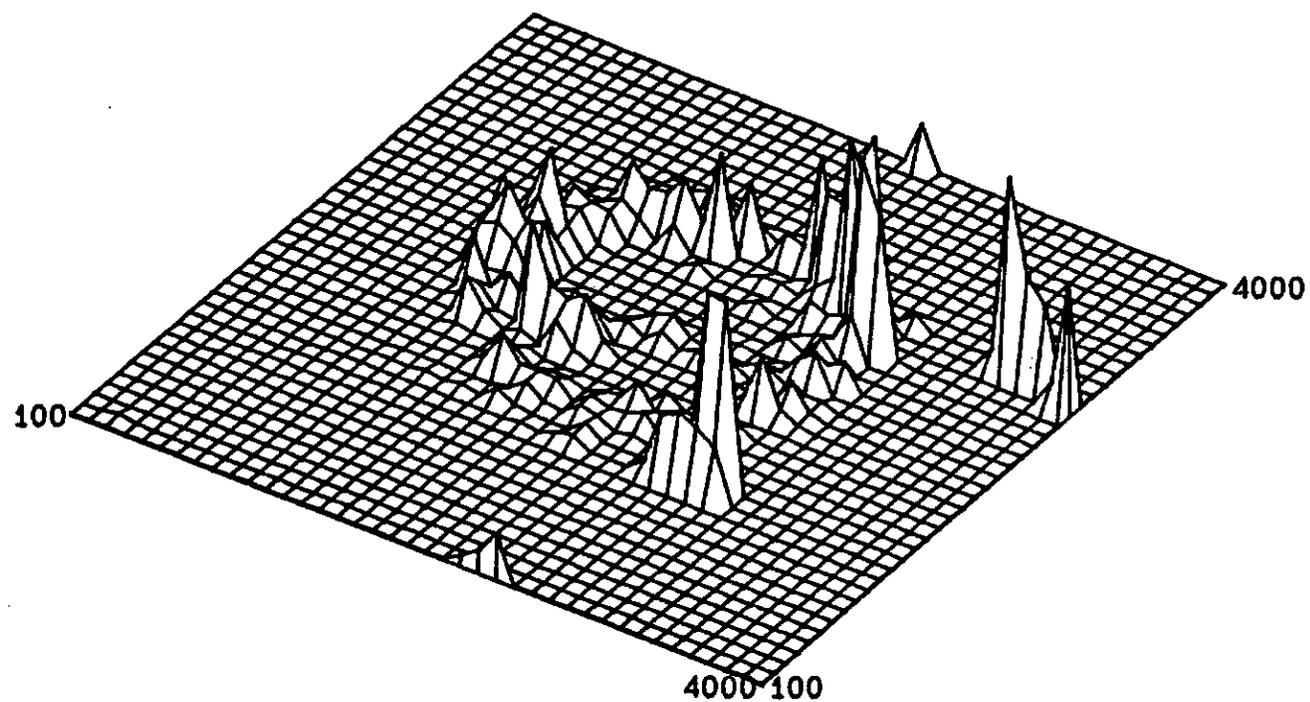


Figure 4a: Représentation en 3D de l'intensité du pic d'absorption à 1020 cm^{-1} par rapport au pic à 1050 cm^{-1} .
Film de PP imprégné de BT.

groupement vinylique et a été observé aussi sur des films de PP dégradés sous décharges dans le n-décane + époxyde.

Dans le cas des films imprégnés de BT, où apparaissent les décharges de grandes amplitudes ($\Sigma q > 30 \text{ nC}$), δV_c dépasse 60% et la zone dégradée par les décharges s'étend à 2,5 mm du centre de la sphère.

Conclusion:

Dans cette étude nous avons montré que les décharges électriques dans des films de PP, imprégnés de BT, en géométrie sphère / plan possèdent une distribution assez typique où elles apparaissent essentiellement au changement de signe de la tension et que leur amplitude et leur fréquence varient dans le temps et en fonction de la tension appliquée. Ces décharges, malgré leur faible amplitude, entraînent une importante dégradation du film et conduisent à un abaissement considérable de sa rigidité diélectrique qui dépasse 30% en 30 mn. Cette dégradation est très hétérogène et localisée au voisinage du point de contact de la sphère avec le film. La visualisation à l'aide d'intensificateur d'images a montré que les décharges se manifestent essentiellement par des points lumineux en bordure d'électrode ce qui confirme une dégradation non homogène. Les points dégradés sont toujours situés à l'extérieur du point de contact de la sphère, ce qui exclut une dégradation par conduction électrique dans le film et confirme une dégradation par les décharges. L'adjonction de l'époxyde au BT, malgré sa tendance à favoriser l'apparition de décharges de fréquence et d'amplitude plus grandes, provoque une dégradation du matériau nettement moindre. L'abaissement de la rigidité diélectrique du film est moins important et le pic d'absorption à 1020 cm^{-1} , caractéristique de la dégradation du matériau, est très faible.

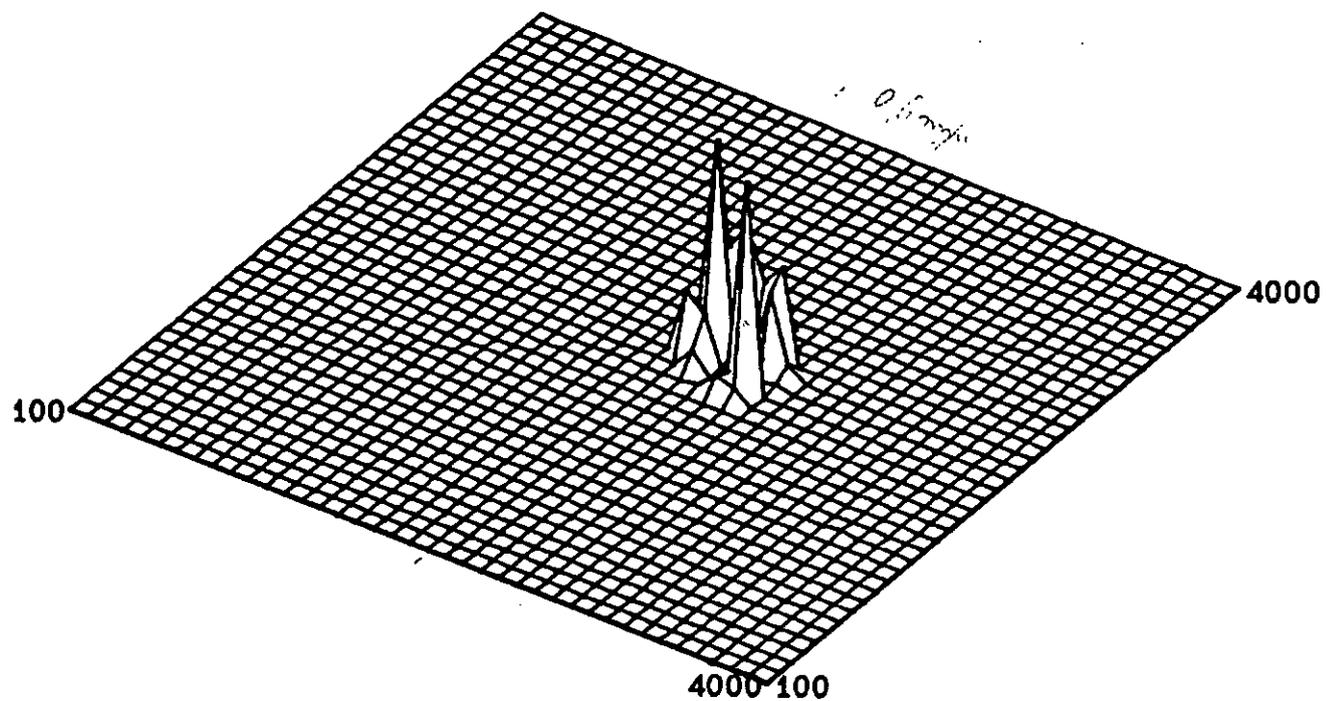


Figure 4b: Représentation en 3D de l'intensité du pic d'absorption à 874 cm^{-1} par rapport au pic à 921 cm^{-1} .
Film de PP imprégné de BT + époxyde.

Bibliographie:

- [1] R. J. MEATS and A. W. STANNETT
Degradation of insulation materials by electrical discharges.
IEEE Trans. on Power Appar. and Syst. Vol. Pas 83; p. 49-54 January 1964.
- [2] M. THIBAUT and J. GALAND
Etudes effectuées en 1971 par le LCIE. Moyens physico-chimiques d'étude des dégradations d'isolations en service.
R. G. E. Tome 81 N° 1, p. 48-53; janvier 1972.
- [3] C. J. MAYOUX
Partial-discharge phenomena and the effect of their constituents on polyethylene.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. EI-11; N° 4, p. 139-149, December 1976.
- [4] G. GARCIA and B. FALLOU
Equipment for the energy measurement of partial discharges.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. EI-19; N° 3, p. 223-226, June 1984.
- [5] V. KIRSHNAN and R. S. NEMA
A study of short-term partial discharge aging of polypropylene film.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. 24; N° 6, p. 1133-1140, December 1989.
- [6] C. RODEHED, A. GUSTAFSSON and U. W. GEDDE
Electrical strength and chemical surface analysis of polypropylene after exposure to external partial discharges.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. 25; N° 6, p. 1066-1076, December 1990.
- [7] G. COLETTI and F. GUASTAVINO
An experimental testing procedure to study the resistance to partial discharges of thin polymeric films.
Nord IS 92 Symp. Vasteras (Sweden), 15; paper n° 5:2, 16 june 1992.
- [8] J. H. MASON
Discharges.
IEEE Trans. on Elec. Insul. Vol. EI-13, N°4, p. 211-238, August 1978.

- [9] Y. YOROZUYA, N. TAKASU, K. SUGANUMA, K. TAKAHASHI, K. KAMBA, and T. ICHIWARA
Study on diagnostic method of deterioration for power capacitors.
Proc. of the 3rd Inter. Conf. on proper. ans Appl. of Dielec. Mater. p. 745-748;
July 8-12; 1991 Tokyo, Japan.
- [10] M. G. DANIKAS and A. J. PERMAIN
The effect of partial discharges on a uniaxially orientated polyethylene/oil insulation system.
4th Inter. Conf. on Dielec. Mat., Meas. and Appl., p. 103-106, Lancaster (UK) 1984.
- [11] M. G. DANIKAS
Study of samples of composite insulating system under electrical and thermal stress.
IEEE Elec. Insul. Mag. January/february 1990; vol. 6 N°1, p. 18-23.
- [12] B.J. BEGGS, I.J. KEMP and A. WILSON
On the correlation between partial discharge parameters and the degradation characteristics of polyester resin insulating systems.
6th Int. Conf. on Dielec. Mater. Meas. and Appl., p. 213-216, Manchester 7-10 sept. 1992.
- [13] E. GULSKI and F.H. KREUGER
Recognition of discharge sources using statistical tools
Proc. of the 3rd Inter. Conf. on proper. ans Appl. of Dielec. Mater., p. 39-42
July 8-12; 1991 Tokyo, Japan.
- [14] B. GOSSE, J.P. GOSSE, S. SAID, A. GADOUM and M. NEMAMCHA
Electrical degradation of polypropylene: A study by FTIR microspectroscopy.
J. of Appl. Polym. Sc. vol. 46, p. 1121-1124, 1992.

CONCLUSION GENERALE

Dans la première partie de ce travail, nous avons montré à partir d'une étude bibliographique que les décharges électriques dans les isolations imprégnées et plus particulièrement dans les condensateurs de puissance restent un sujet d'actualité et grand intérêt scientifique et économique. Nous avons présenté le dispositif de détection des décharges qui a été mis au point au LEMD et qui possède une sensibilité de 0,2 pC et une résolution temporelle de 320 μ s. Les caractéristiques de ce dispositif nous ont permis de faire l'étude des décharges dues à différents défauts pour des tensions voisines de la tension seuil de leur apparition. Nous avons développé un logiciel d'analyse des décharges permettant la représentation graphique des grandeurs mesurées et le calcul des différents paramètres statistiques associées aux distributions $n(\phi)$ et $q(\phi)$.

Dans la deuxième partie, nous avons montré que les décharges dans une isolation mixte solide/liquide sont caractérisées par des grandeurs qui dépendent de la géométrie des électrodes et du site de décharges dans cette isolation. Ces grandeurs ont été déterminées pour un certain nombre de configurations simulant des défauts de différentes géométries et différents environnements et plus particulièrement dans des modèles de condensateur au polypropylène imprégné. Dans ces modèles, la nature du liquide imprégnant et la pression hydrostatique sur le liquide influencent les grandeurs caractéristiques des décharges (amplitude, fréquence, lumière émise). Les grandeurs caractéristiques des décharges dans différentes configurations constituent une base de données qui est utilisée dans le modèle d'identification des sources de décharges que nous avons élaboré. Ce modèle semble être prometteur et mérite un perfectionnement. Son amélioration doit se faire d'abord par l'introduction d'autres grandeurs caractéristiques des décharges (comme les paramètres statistiques conditionnels) et l'élargissement de sa banque de données à d'autres configurations types de géométrie contrôlée, ce qui permettrait d'identifier en plus de la nature du défaut, sa taille.

Dans la troisième partie, consacrée au vieillissement de modèles de condensateur au polypropylène imprégné de monobenzyltoluène sous différentes contraintes électriques et thermiques, nous avons montré que lors d'essais sous tension inférieure à la tension d'apparition des décharges, l'abaissement de la rigidité diélectrique peut être important, il est causé par des phénomènes électrochimiques liés au passage du courant dans le condensateur. Aux tensions supérieures, l'étude de l'action des décharges sur des films de polypropylène imprégnés a montré que la dégradation du film est hétérogène et très localisée. Elle se traduit par une oxydation

radicalaire du film et un rapide abaissement de sa rigidité diélectrique (~30% en 30 mn).

A la lumière des résultats obtenus dans cette étude, nous pensons que son prolongement doit s'orienter vers une approche plus fondamentale du phénomène de décharges avec des moyens d'analyse encore plus fins (meilleure sensibilité et meilleure résolution temporelle). La mesure de la lumière émise par les décharges mérite d'être affinée par la recherche d'une corrélation entre le pic de lumière et l'impulsion de décharge. En associant au dispositif de détection des décharges un montage intensificateur d'image commandé par le signal de décharge, nous pourrions établir une cartographie de l'intensité de lumière émise et de l'amplitude des décharges.

Résumé

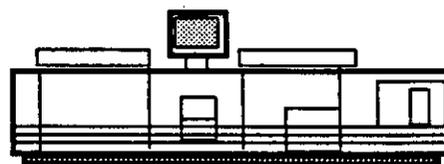
Ce travail porte sur l'étude des décharges dans différentes structures d'isolation imprégnée et notamment dans des modèles de condensateur au polypropylène imprégné. Nous montrons que chaque structure simulant un défaut est caractérisée par ses paramètres des distributions du nombre de décharges $n(\phi)$ et de la charge apparente dans le cycle $q(\phi)$. Les mesures de décharges effectuées sur des défauts type constituent une banque de données du modèle d'identification des sources de décharges que nous avons élaboré. Lors d'essais de vieillissement accéléré de modèles de condensateur au polypropylène imprégné de monobenzyltoluène, quand la tension appliquée est inférieure à la tension d'apparition des décharges, l'abaissement de la rigidité diélectrique peut être important. Il est causé par des phénomènes électrochimiques liés au passage du courant dans le condensateur. Aux tensions supérieures, nous montrons que des décharges de faible amplitude, (μpC), causent une dégradation hétérogène et très localisée du film de polypropylène et un abaissement de sa rigidité diélectrique d'environ 30% pour une charge totale inférieure à 10 nC.

Abstract:

The present study is concerned with the electrical discharges in different configurations of impregnated insulation and particularly in all-PP film capacitor models. We show that every configuration is characterized by typical parameters of $n(\phi)$ and $q(\phi)$ distributions. Discharges measured on simulated defects form a data bank of the model of discharges sources recognition of which we have. During aging test of capacitor models made of polypropylene films impregnated with monobenzyltoluene, when the applied voltage is less than the inception voltage of discharges, the decreasing of the breakdown strength can be important and due to the creation of excited species resulting from an electrochemical process. For higher applied voltage, discharges with a small apparent charge (μpC) caused an heterogeneous damage of the PP film, decreasing its breakdown strength by about 30 % for a total apparent charge less than 10 nC.



Grenoble, janvier 1994



Impression et finition réalisées sur Rank Xerox 5090,
au Service Reprographie du CNRS.