



HAL
open science

DECHARGES PARTIELLES DANS LES CONDENSATEURS TOUT-FILM IMPREGNES

Redouane Hammal

► **To cite this version:**

Redouane Hammal. DECHARGES PARTIELLES DANS LES CONDENSATEURS TOUT-FILM IMPREGNES. Physique [physics]. Université Joseph Fourier (Grenoble I), 1998. Français. NNT : . tel-02026128

HAL Id: tel-02026128

<https://hal.science/tel-02026128>

Submitted on 20 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THESE
PRESENTEE PAR**

HAMMAL Redouane

Diplômé de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble

**Pour obtenir le titre de DOCTEUR
DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE 1**

(Arrêtés ministériels du 5 Juillet 1984 et du 30 Mars 1992)

SPECIALITE : PHYSIQUE

**DECHARGES PARTIELLES DANS LES CONDENSATEURS
TOUT-FILM IMPREGNES**

Soutenu le 27 Janvier 1998

COMPOSITION DU JURY

M. Bui Ai	Rapporteur
M. L. Centurioni	Rapporteur
M. J. P. Ferrieux	Examineur
M. C. Hantouche	Examineur
M. J. P. Gosse	Examineur
M. P. Rain	Examineur

Thèse préparée au sein du Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques (UMR5517)
CNRS / Université Joseph Fourier-Grenoble 1.

*A mes parents
A mes frères et sœur*

Remerciements

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une coopération entre le Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques et Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches, Les Renardières.

Je tiens à remercier Monsieur le Professeur J. P. Gosse, qui a encadré ce travail, pour l'accueil qu'il m'a réservé et pour l'intérêt qu'il n'a cessé de manifester pour ce travail.

Je remercie également Monsieur P. Rain, Maître de conférence, pour avoir accepté de co-encadrer ce travail et pour les fructueuses discussions que nous avons eues.

Mes remerciements vont également à Madame B. Gosse, Directeur de recherches au CNRS pour m'avoir accueilli dans l'équipe de recherche qu'elle dirige ainsi que pour sa disponibilité et les précieux conseils qu'elle m'a prodigués tout au long de ces trois années.

A Monsieur C. Hantouche, Chef de Projet à Electricité de France, j'exprime toute ma gratitude, pour sa disponibilité et son ouverture d'esprit.

Je remercie chaleureusement Monsieur Bui Ai, Directeur de Recherches au CNRS qui m'a fait l'honneur de présider la commission d'examen ainsi que pour avoir accepté de rapporter ce travail.

Je remercie vivement Monsieur le Professeur L. Centurioni qui a rapporté ce travail avec efficacité, malgré les retards d'acheminement du courrier.

Que Monsieur le Professeur J. P. Ferrieux soit assuré de ma sincère gratitude pour avoir accepté de faire partie de la commission d'examen et pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

A Monsieur J. P. Roux, Ingénieur au LEMD, j'exprime toute ma reconnaissance pour sa disponibilité et son aide dans la réalisation de ce travail. Je n'oublierai pas Monsieur C. Marteau, Ingénieur au LEMD, aujourd'hui à la retraite, qui a réalisé le dispositif d'acquisition des décharges partielles.

J'exprime ici toute ma sympathie à mes collègues et amis thésards ou ex-thésards du LEMD et particulièrement Fathi Jomni, Gaston Massala, Muhammad Nur, Pierre-Olivier Sassoulas, Bruno Seguin et Tran Van Top.

Mes remerciements vont également à l'ensemble du personnel du LEMD en particulier à Monsieur G. Lauhier et à Madame C. Roux.

Enfin, un grand merci à mes amis Ziad Ayoub-Arbache, Ghaouti Bentoumi et Mahfoud Yamouni pour le soutien moral qu'il m'ont apporté dans des moments d'incertitude.

TABLE DES MATIERES

Table des matières.

INTRODUCTION GENERALE.....	15
CHAPITRE I	
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES DECHARGES PARTIELLES.....	19
I. Définition et terminologie.....	22
I.1. Définitions.....	22
I.2. Classification et terminologie.....	22
II. Techniques de détection et de mesure des décharges partielles.....	23
II.1. Objectif.....	23
II.2. Les différentes techniques de détection.....	23
II.2.a. les méthodes autres qu'électriques.....	24
II.2.b. la détection électrique.....	24
1. historique.....	24
2. les montages de détection électrique.....	25
3. les grandeurs liées aux DP.....	28
4. les grandeurs calculées.....	34
5. la calibration de la mesure de la charge des DP.....	35
III. Techniques d'analyse des DP.....	36
IV. Reconnaissance des défauts.....	36
IV.1. Objectifs.....	36
IV.2. Procédures.....	37
IV.3. Reconnaissance par observation directe.....	37
IV.4. Reconnaissance par utilisation de coefficients statistiques portant sur les distributions.....	38
IV.5. Méthodes diverses.....	40
IV.6. Utilisation des réseaux de neurones.....	40
IV.7. Synthèse sur la reconnaissance des défauts.....	42
V. Rappels sur les phénomènes de DP.....	42
V.1. Décharges en pointe-plan dans un liquide.....	43
V.2. Décharges dans un condensateur imprégné.....	44
CHAPITRE II	
DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX.....	49
I. Présentation du dispositif.....	52

II. Cellule d'étude et matériaux étudiés.....	53
II.1. Cellule d'étude.....	53
II.2. Le polypropylène.....	54
II.3. Le jarylec.....	55
II.4. L'imprégnation de la cellule d'étude.....	56
III. Dispositif d'application de la tension et de mesure des DP.....	57
III.1. La source de tension.....	57
III.2. La cage de Faraday.....	57
III.3. Les caractéristiques du mesureur.....	57
III.4. Le fonctionnement du mesureur.....	58
IV. Logiciels d'acquisition et de traitement.....	60
IV.1. Logiciel d'acquisition des DP.....	60
IV.2. Logiciel de traitement des résultats.....	61
IV.2.a. les distributions du nombre et de l'amplitude des DP.....	61
IV.2.b. paramètres calculés.....	63
IV.2.c. paramètres que nous avons introduits.....	63
V. Autres dispositifs.....	64
V.1. Dispositif de mesure des impulsions de courant.....	64
V.2. Dispositif de visualisation des DP.....	64
V.3. Dispositif de mesure du courant lumineux.....	65
V.4. Dispositif de vieillissement des modèles.....	65
V.5. Dispositif de mesure des DP à froid.....	65
VI. Tests de validation du mesureur de DP.....	66
V.1. Symétrie de détection et de mesure entre DP positives et DP négatives.....	66
V.2. Mesure de DP très rapprochées.....	67

CHAPITRE III

DP DANS UN MODELE DE CONDENSATEUR SANS DEFAUT.....	71
Introduction.....	73
Distribution du champ électrique dans le modèle de condensateur.....	73
I. DP dans une cellule symétrique sans défaut.....	75
I.1. Description.....	75
I.2. Mesure des DP.....	75
I.2.a. tension d'apparition des DP.....	75
I.2.b. évolution des DP en fonction de la tension appliquée.....	76
I.3. Emission de lumière.....	79
I.3.a. résultats.....	79
I.3.b. conclusions.....	82
I.4. Distributions des DP et coefficients statistiques.....	83
I.4.a. distributions des DP.....	83

I.4.b. paramètres statistiques.....	83
I.5. Effet de l'épaisseur du PP.....	84
I.6. Effet d'une sur épaisseur de liquide.....	85
I.6.a. évolution des DP en fonction de la tension appliquée.....	85
I.6.b. distributions des décharges dans la phase.....	87
I.6.c. paramètres statistiques.....	88
I.6.d. discussion.....	89
I.7. Effet de la température.....	89
I.7. a. procédure expérimentale.....	89
I.7.b. résultats.....	89
I.7.c. discussion.....	91
II. DP dans une cellule dissymétrique.....	93
II.1. Description.....	93
II.2. Tension d'apparition des DP.....	93
II.3. Evolution des DP en fonction de la tension appliquée.....	94
II.3.a. fréquence des DP.....	94
II.3.b. charge apparente moyenne.....	95
II.3.c. répartition des décharges en fonction de leur signe.....	96
II.4. Distributions des DP.....	97
II.4.a. distributions du nombre des DP.....	97
II.4.b. distributions de la charge apparente moyenne.....	98
II.4.c. distributions de la probabilité de la charge d'une DP.....	99
II.5. Paramètres statistiques.....	100
II.5.a. coefficients statistiques de $n(\Phi)$	100
II.5.b. coefficients statistiques de $Q(\Phi)$	101
II.5.c. coefficient d'efficacité énergétique.....	102
II.6. Effet de l'épaisseur du PP.....	102
II.6.a. influence sur la fréquence des DP.....	103
II.6.b. influence sur la charge des DP.....	104
II.6.c. influence sur les tensions caractéristiques.....	105
II.7. Evolution en fonction du temps.....	107
II.7.a. tension d'apparition par décharge.....	107
II.7.b. charge apparente des DP.....	107
III. Vieillessement d'une cellule sans défaut.....	109
III.1. Procédure de vieillessement. Effet de la température.....	109
III.2. Résultats.....	110
III.2.a. DP dans un modèle vieilli.....	110
III.2.b. DP dans un modèle neuf imprégné de liquide vieilli.....	111
III.3. Conclusion.....	113
IV. Discussion chapitre III.....	114
CHAPITRE IV	
DP PROVOQUEES PAR UN DEFAUT DANS LE MODELE DE	
CONDENSATEUR.....	117

I. Défaut d'imprégnation.....	119
I.1. Procédure expérimentale.....	119
I.2. Caractérisation du défaut.....	119
I.3. Résultats.....	120
I.3.a. tension d'apparition des DP.....	120
I.3.b. évolution des DP.....	121
I.3.c. distributions des DP et paramètres statistiques.....	126
I.4. Influence de la marge sur le temps de retard au claquage.....	129
I.5. Essais en surtension.....	130
I.5.a. visualisation.....	130
I.5.b. évolution de la charge moyenne.....	131
I.5.c. distributions des DP dans la phase.....	132
I.5.d. évolution d'une surtension à une autre.....	132
I.5.e. surtensions spéciales.....	133
I.6. Conclusion.....	138
II. Défaut de contact.....	140
II.1. Procédure expérimentale.....	140
II.2. Résultats expérimentaux.....	140
II.2.a. tension d'apparition des DP.....	140
II.2.b. évolution des DP.....	141
II.2.c. distributions des DP.....	142
II.2.d. paramètres statistiques.....	144
II.2.e. tests de surtension.....	144
II.3. Discussion.....	145
III. Cavité dans un film de PP.....	146
III.1. Procédure expérimentale.....	146
III.2. Résultats avec une cavité de 3 mm de diamètre.....	146
II.2.a. tension d'apparition des DP.....	146
II.2.b. évolution des DP.....	147
II.2.c. distributions des DP.....	149
II.2.d. paramètres statistiques.....	151
II.2.e. évolution en fonction du temps.....	152
III.3. Résultats avec une cavité de 300 µm de diamètre.....	152
III.4. Vieillissement de modèles contenant une cavité.....	153
III.5. Discussion.....	155
IV. Pli dans un film de PP.....	158
IV.1. Procédure expérimentale.....	158
IV.2. Résultats.....	158
IV.2.a. tension d'apparition des DP.....	158
IV.2.b. évolution des DP.....	158
IV.2.c. distributions des DP.....	160
IV.2.d. paramètres statistiques.....	161
IV.3. Discussion.....	161

CHAPITRE V	
SYNTHESE SUR L'IDENTIFICATION D'UNE SOURCE DE DP.....	163
V.1. Liste des défauts étudiés.....	165
V.2. Evolution des DP en fonction du temps.....	165
V.3. Paramètres servant à la reconnaissance.....	166
V.4. Valeurs des paramètres.....	166
V.4.a. tension d'apparition des DP.....	167
V.4.b. tension de transition.....	167
V.4.c. coefficients de position.....	168
V.4.d. coefficient EEF.....	169
V.4.e. moments d'ordre 3.....	169
V.4.f. moments d'ordre 4.....	170
V.5. Algorithme de reconnaissance d'une source de DP.....	171
V.6. Conclusion.....	172
CONCLUSION GENERALE.....	175
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	179
ANNEXES.....	187
Annexe 1. Les condensateurs de puissance.....	189
Annexe 2. Les réseaux de neurones.....	192
Annexe 3. Calcul du facteur d'espace.....	196
Annexe 4 Détermination du volume gazeux formé par vaporisation de liquide sous l'effet d'une décharge.....	198
Annexe 5. DP dans un modèle de condensateur sans défaut à armatures symétriques.....	205

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les mesures de décharges partielles sont utilisées depuis quelques années comme tests non destructifs pour la détection de défauts dans un appareil électrique afin d'évaluer son état de fonctionnement et d'estimer sa durée de vie, cette évaluation pouvant se faire soit en fin de fabrication soit en cours de fonctionnement [Han95, Fuh93].

Une première approche a été la mise au point par un groupe de travail de la CIGRE en 1969 d'une méthode de caractérisation des sources de décharges par l'observation directe des oscillogrammes [Cig69]. Avec le développement des techniques numériques de traitement des données, de nouvelles potentialités de caractérisation se sont dégagées et de nombreux travaux ont été consacrés à la caractérisation de défauts artificiels. A chaque défaut est attribuée une empreinte constituée de coefficients déduits des mesures des décharges partielles. Ces coefficients découlent du traitement numérique des mesures de décharges et plus particulièrement de la représentation de l'intensité ou du nombre de décharges sous forme de distributions. L'idée est que la forme de ces distributions peut être fidèlement restituée par un ensemble de coefficients ou empreinte. Si chaque type de défaut donne une empreinte distincte, il sera possible de détecter sa présence dans un appareil [Tan78, Gul92]. Ainsi l'empreinte d'un défaut inconnu est comparée à une base de donnée préalablement établie. Le recours à des méthodes de reconnaissance de formes est également un moyen de réaliser cette reconnaissance [Suz92, Kri95]. Ces méthodes ont toutes pour point commun une difficulté d'extension à des cas réels des résultats obtenus avec des modèles de laboratoire.

Notre étude a pour but d'élaborer une méthode de diagnostic applicable aux condensateurs de puissance tout-film utilisés pour le redressement du facteur de puissance.

Des études sur les pannes dans ces condensateurs ont conclu qu'une des principales causes de leur défaillance est l'apparition de décharges partielles [Kra67]. Il faut tout d'abord recenser les causes d'apparition de ces décharges.

Actuellement, ces appareils sont soumis à des gradients de service de $75 V_{\text{eff}}/\mu\text{m}$ [Han97]. Dans ces conditions, un défaut accidentellement introduit lors de la fabrication de l'appareil (défaut d'imprégnation ou de contact, trou dans un film, surépaisseur de liquide) peut générer des décharges partielles provoquant dans la plupart des cas une dégradation de l'isolant et conduisant à une détérioration en un temps plus ou moins long.

D'autre part, les gradients moyens encore accentués lors de surtensions dans le réseau, correspondent à des champs électriques en bord d'armature de quelques MV/cm, une valeur proche des seuils d'avalanches électroniques dans les hydrocarbures [Den87]. Ces avalanches vont créer par vaporisation du liquide imprégnant, une phase gazeuse pouvant être le siège de décharges partielles intenses.

Ces appareils sont également soumis à des contraintes thermiques sévères qui accentuent leur probabilité de claquage [Han93].

Cette étude porte sur des modèles de condensateurs plans de faible capacité, contenant ou pas un défaut. Elle s'articule de la manière suivante :

Dans une première partie nous faisons une synthèse bibliographique sur les décharges partielles : définition, terminologie, techniques de détection, grandeurs mesurées, techniques de reconnaissance des défauts. Nous abordons également les phénomènes de préclaquage des condensateurs imprégnés en faisant un rappel sur la conduction des liquides sous champ électrique intense.

Le second chapitre est consacré à la description des dispositifs expérimentaux qui nous ont permis d'effectuer ce travail : dispositif de détection des décharges, dispositif de visualisation et d'acquisition de la lumière émise par les décharges, dispositif de vieillissement.

Les chapitres 3 et 4 sont consacrés aux résultats des mesures de décharges partielles.

-Dans le chapitre 3 nous étudions les décharges partielles apparaissant dans des modèles de condensateurs tout-film sans défaut. Nous étudions l'effet de l'épaisseur du diélectrique ou des armatures ainsi que l'effet de l'abaissement de la température sur ces décharges.

-Dans le chapitre 4 nous présentons les résultats obtenus lorsqu'un défaut est introduit dans la cellule d'étude.

-Dans ces deux chapitres, nous déterminons la tension d'apparition des décharges partielles, leur évolution en fonction de la tension appliquée et du temps. Nous examinons quels sont les paramètres statistiques qui peuvent caractériser le type de décharges étudié. Nous nous intéressons également à l'effet du vieillissement accéléré sur une cellule avec ou sans défaut.

Le chapitre 5 rassemble les outils d'identification des décharges et propose un algorithme de reconnaissance basé essentiellement sur des coefficients que nous avons introduits au cours de cette étude.

Enfin, dans la conclusion, nous dégageons les résultats essentiels de cette étude et les perspectives de recherches qui en découlent.

CHAPITRE I

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES DESCHARGES
PARTIELLES**

CHAPITRE I

Etude bibliographique des décharges partielles

PREAMBULE :

Dès la fin du 19^{ème} siècle, le développement de l'industrie électrotechnique s'est accompagné d'un intérêt grandissant pour la compréhension et la prévision des phénomènes qui conduisent au claquage des appareils. Il s'agissait alors de savoir si les pannes étaient uniquement la conséquence du vieillissement naturel des matériaux ou s'il existait des phénomènes qui pouvaient les provoquer, dans des temps plus ou moins longs.

Avec la mesure des champs de claquage, il s'est avéré que les valeurs obtenues étaient bien supérieures aux champs pour lesquels les appareils mis sous tension tombaient en panne.

C'est ce qui a conduit à la conclusion que le matériau isolant pouvait être le siège de phénomènes transitoires provoquant sa détérioration progressive.

Un de ces phénomènes est celui des décharges partielles. Certains auteurs ont fait l'historique de l'étude des décharges partielles [Bar87, Mas78]. Les premiers travaux d'importance sur les décharges ont concerné les gaz [De178', Pas89'].

Depuis, de nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des phénomènes prédisruptifs et disruptifs dans les milieux denses.

Mais l'utilisation de matériaux de synthèse de plus en plus complexes et ayant de meilleures propriétés diélectriques a rendu la compréhension des phénomènes plus difficile et a conduit à la mise au point de dispositifs de mesure de plus en plus sophistiqués.

Dans ce chapitre nous présentons une revue bibliographique sur les décharges partielles qui comportera :

1. définition et terminologie
2. techniques de détection et de mesure et grandeurs à mesurer
3. techniques numériques d'analyse des DP
4. reconnaissance des défauts.

La dernière partie de ce chapitre est consacré aux phénomènes de décharges partielles dans les liquides et dans les condensateurs imprégnés.

I. DEFINITIONS ET TERMINOLOGIE

I. 1. Définition :

Dans un milieu diélectrique soumis à un champ électrique, un déplacement local d'électrons et d'ions peut avoir lieu soudainement lorsque le champ électrique dépasse un seuil déterminé. Ce phénomène transitoire de déplacement de charges est une décharge partielle. Il existe parfois une confusion dans la terminologie. Ainsi on peut trouver des termes tels que : décharge couronne, avalanche électronique, ionisation...au lieu de décharge partielle.

Voici la définition recommandée par la CEI :

Une décharge partielle est une décharge électrique qui ne court-circuite que partiellement un isolant placé entre deux électrodes et entre lesquelles une différence de potentiel est appliquée [CEI81]. La décharge partielle peut avoir lieu près d'un conducteur ou à l'intérieur de l'isolant.

I. 2. Classification et terminologie :

La classification des décharges partielles varie suivant le critère de sélection utilisé :

Kreuger [Kre89] classe les décharges en fonction de leur localisation. Ainsi il définit 4 catégories :

1. Les décharges internes : Elles prennent naissance en des endroits du diélectrique où la rigidité diélectrique est faible. Une cavité dans un solide ou une bulle dans un liquide par exemple.
2. Les décharges de surface : elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe sur la surface d'un diélectrique.
3. Les décharges couronnes : elles apparaissent au niveau des pointes où le champ électrique est renforcé. La décharge est restreinte à une zone très réduite entourant la pointe.
4. Les arborescences : l'arbre électrique prend naissance sur un défaut de l'isolation. Il y a une croissance des différentes branches de l'arbre qui sont le siège de décharges.

Par ailleurs, l'aspect impulsionnel ou non de la décharge est utilisé comme autre critère de classification des décharges [Van94]:

Le caractère impulsionnel de la décharge est la conséquence de l'accumulation de la charge d'espace qui réduit localement le champ à un niveau insuffisant pour maintenir la multiplication des charges.

Les décharges non impulsionnelles (exemple : *glow discharges*) sont caractérisées par un courant qui est constant ou très peu variable en fonction du temps, pour une tension donnée.

Morshuis [Mor93] propose une classification des décharges enregistrées dans des cavités de polyéthylène basée sur les différences constatées dans l'allure des courants de décharge (durée de l'impulsion, temps de montée, hauteur) et dans les observations de lumière. Il a mis en évidence la présence de trois régimes de décharges : -le régime *streamer-like*, le régime *Townsend-like* et enfin les *pitting discharges*.

D'autres synthèses sur la terminologie relative aux décharges partielles ont été publiées [Dan93, Bar93].

II. TECHNIQUES DE DETECTION ET DE MESURE DES DECHARGES PARTIELLES

II. 1. Objectifs:

L'objectif de la détection des décharges partielles est de déceler d'éventuels défauts dans un appareil afin d'évaluer sa durée de vie.

D'après Kreuger [Kre89], quatre étapes doivent être remplies en vue d'atteindre cet objectif. Ces étapes sont :

1. La détection : elle consiste à déceler la présence d'une décharge
2. La mesure : elle doit permettre par un choix judicieux des grandeurs, de quantifier l'intensité de la décharge
3. La localisation
4. L'évaluation : déterminer le degré de nuisance des décharges afin de prévoir leur effet sur la durée de vie du matériau

II. 2. Les différentes techniques de détection:

La principale technique est celle qui consiste à mesurer le courant ou la charge d'une décharge : c'est la méthode électrique. Nous détaillerons cette technique après avoir passé en revue les autres méthodes de détection.

En plus des méthodes électriques, les principales méthodes de détection utilisent les phénomènes physico-chimiques qui se manifestent lors de l'apparition d'une décharge.

II. 2. a. Les principales méthodes autres qu'électrique:

II. 2. a. 1. La détection radio :

Les ondes électromagnétiques générées par une décharge sont captées par un récepteur à l'aide d'une antenne. Cette méthode ne permet ni de localiser ni de mesurer la décharge.

On peut ajouter la nouvelle technique dite technique UHF utilisée dans le cas des postes blindés isolés au gaz [Sel95]. Les décharges produisent une série d'impulsions dont la durée est inférieure à 1 ns. Chaque impulsion génère une onde électromagnétique qui se propage dans le domaine UHF (300 à 1500 Mhz).

II. 2. a. 2. La détection acoustique : [Lun192, Lun292]

La décharge est comparée à une explosion qui donne naissance à une onde acoustique (dans le domaine audible ou ultrasonique) qui va se propager à travers le matériau isolant et être captée par un détecteur. En général, un microphone ultrasonique est utilisé. Les signaux sont ensuite convertis en son audible.

Cette méthode permet de localiser avec précision la décharge et de mesurer également son énergie qui est proportionnelle au carré de l'intensité des signaux captés.

II. 2. a. 3. La détection optique:

La lumière émise se situe dans le domaine visible ou UV et est souvent de faible intensité, ce qui nécessite de travailler dans une chambre noire.

Avec l'utilisation d'une caméra, cette méthode permet de localiser les décharges avec précision mais la corrélation entre l'amplitude de la décharge et l'intensité de la lumière émise est difficile à établir. Avec un photomultiplicateur, on arrive à corréler la lumière avec l'amplitude de la décharge et à détecter des impulsions isolées.

II. 2. a. 4. Autres méthodes: réactions chimiques, pression des gaz, dégagement de chaleur...

II. 2. b. La détection électrique :

II. 2. b. 1. Historique:

De nombreuses mises au point sur les techniques de détection et de mesure des décharges ont été publiées. On citera celles de Kreuger [Kre89], Bartnikas [Bar79, Bar87] et Natrass [Nat88].

Voici en résumé l'évolution historique des principales techniques de détection des décharges partielles:

En 1920, la mesure de l'angle de pertes dans les câbles à l'aide d'un pont de Schering [Sch24] a été un des premiers outils de diagnostic de l'état d'un diélectrique. L'auteur a observé l'existence d'un seuil de tension au delà duquel l'augmentation de la puissance dissipée en fonction de la tension appliquée était accélérée.

L'observation des oscillogrammes des courants de décharges a été réalisée pour la première fois par Lloyd et al, en 1927 [Llo27]. De nombreuses études ont suivi et ont abouti à l'utilisation de circuits de détection de type RC ou RLC.

En 1940, Paine et Brown [Pai40] ont utilisé des circuits résonnants pour la détection des décharges dans les câbles.

Mason [Mas53] s'est également penché sur l'utilisation des oscillogrammes pour évaluer la dégradation d'une isolation plastique sous décharges.

II. 2. b. 2. Les montages de détection électrique :

Les montages actuellement utilisés sont dérivés du dispositif mis au point par Austen et Whitehead, en 1941 [Aus41]. Un des paramètres essentiels d'un tel montage est la bande passante :

Boggs et al [Bog82] classent les détecteurs de la manière suivante :

1. détecteurs à bande étroite : ayant une bande passante de 10 kHz centrée à 20 ou 30 kHz. L'inconvénient que présente l'utilisation de tels dispositifs est le risque d'interférence de 2 décharges successives trop rapprochées.
2. détecteurs à large bande : ayant une bande passante de 100 kHz centrée à 200 ou 300 kHz. Ces dispositifs ne sont pas très adaptés lorsque, comme dans les câbles, le signal se propage et est par conséquent atténué avec un facteur d'atténuation qui augmente avec la fréquence.
3. détecteurs à ultra-large bande (100 kHz à 1 GHz): ces détecteurs permettent de séparer des décharges individuelles dont la durée est de l'ordre de la nanoseconde.

L'importance du choix de la bande passante a été confirmée par l'étude faite par Bartnikas sur l'effet du temps de montée d'une impulsion sur la réponse d'un détecteur [Bar72].

Actuellement, on peut trouver deux types de montages :

Montages en pont :

Ce type de montage est bien adapté lorsque les mesures sont effectuées en présence de bruit ambiant.

La cellule d'étude est placée dans une des branches du pont (voir schéma de la figure 1) :

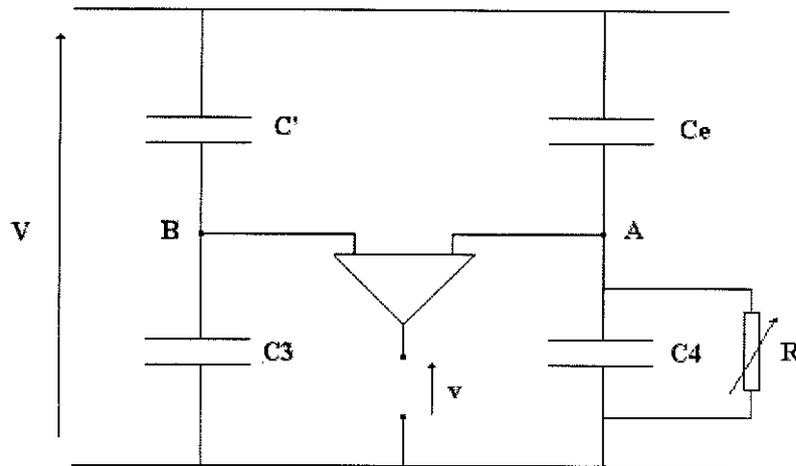


Figure 1. Schéma d'un système de détection en pont

Le condensateur C' a la même capacité que la cellule d'étude C_e et est dépourvu de décharges dans la gamme de tension étudiée.

En l'absence de décharges partielles, le pont est équilibré. La condition d'équilibre peut être optimisée en variant légèrement le potentiomètre R .

Lorsqu'une décharge apparaît, la tension V_{AB} entre les points A et B n'est plus nulle car une charge q parcourt la branche C_e - C_4 . V_{AB} est proportionnelle à la charge q .

La tension V_{AB} est amplifiée et visualisée à l'aide d'un oscilloscope. La tension en sortie de l'amplificateur est v .

Lorsqu'il y a plusieurs décharges, on obtient, en mode XY de l'oscilloscope, une figure de Lissajou pour la courbe $v=f(V)$ (figure 2 ci dessous). Lorsque les décharges deviennent de plus en plus nombreuses, cette figure tend à prendre la forme d'un parallélogramme.

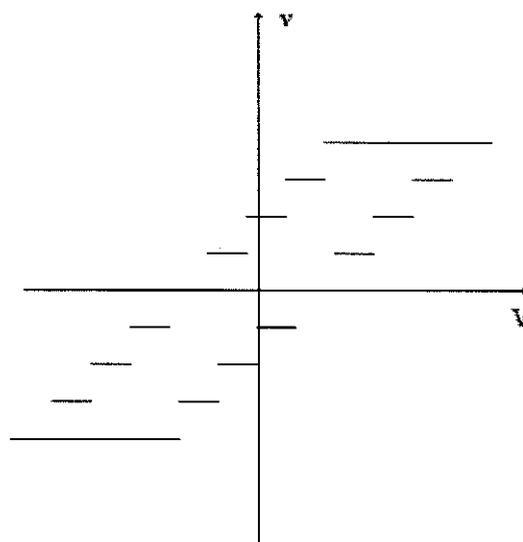


Figure 2 . Diagramme XY de la tension v en sortie de l'amplificateur en fonction de la tension appliquée V .

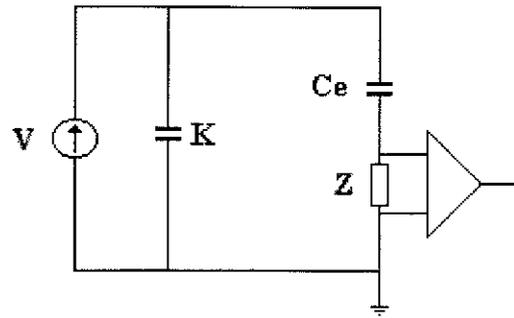
La détection directe :

Figure 3. Schéma de principe de la détection directe des décharges partielles.

V est la tension délivrée par la source, C_e est la cellule d'étude, K est un condensateur de couplage dont l'impédance est faible vis à vis des courants de décharges qui sont de haute fréquence et qui sert également à stabiliser la tension appliquée à l'échantillon, Z est l'impédance de mesure. Elle peut être placée également en série avec la capacité de couplage. La sortie de l'amplificateur est reliée à un appareil de mesure ou à un oscilloscope.

Il existe deux types d'impédances de mesure : RC (parallèle) ou RLC (parallèle). L'impédance RLC étant la plus utilisée.

La réponse du circuit RC (tension V_s aux bornes de Z) à une décharge unique est une impulsion exponentielle décroissante.

Le circuit RLC permet de filtrer le signal basse fréquence (50 Hz) de la source. La réponse du circuit RLC à une décharge unique est oscillatoire et amortie.

Dans les deux cas, la hauteur de l'impulsion est indépendante de la résistance de mesure R . Elle est également proportionnelle à la charge q , ce qui permet d'obtenir la charge en mesurant la hauteur de l'impulsion. La charge peut être obtenue également par intégration du courant de décharge.

Si V_{ce} est la tension aux bornes de la cellule d'étude, le courant i qui traverse cette cellule est la somme de 3 termes:

un courant capacitif $i_c = C_e \frac{dV_{ce}}{dt}$, sinusoïdal, en quadrature de phase avec la tension V_{ce} .

un courant ohmique $i_{ohm} = \frac{V_{ce}}{R}$, où R est la résistance équivalente de la cellule d'étude.

Ce courant est en phase avec la tension et a une intensité négligeable car la cellule est isolante.

un courant impulsionnel i_{dp} délivré par le condensateur de couplage afin de compenser la chute de tension causée par le déclenchement d'une décharge partielle dans la cellule d'étude.

On peut écrire:

$$i = i_{dp} + i_{ohm} + i_{ce} \quad (I-1)$$

Cas d'une impédance de mesure RLC : L'impédance Z supprime la composante basse fréquence du courant i , c'est à dire les termes i_{ohm} et i_c . N'est conservé que le terme i_{dp} .

Remarque : L'amplificateur de mesure doit être choisi de façon à couvrir le spectre en fréquence des impulsions de décharge.

II. 2. b. 3. Les grandeurs liées aux décharges partielles :

Le bruit de fond :

Un inventaire des parasites externes à caractère entretenu pouvant entacher la mesure des décharges partielles a été établi par un groupe de travail de la CIGRE et publié dans Electra [Ele72]. Les voies d'acheminement du bruit et les méthodes d'élimination y sont détaillées.

Selon Weber et al [Web86], les parasites qui perturbent la mesure des décharges partielles peuvent se classer en deux catégories :

1. Les signaux impulsionnels aléatoires: ils sont distribués de façon plus ou moins aléatoire dans le temps et occupent un large domaine de fréquence (de quelques kHz à quelques MHz)
2. Les signaux périodiques continus dans le temps et ayant des fréquences bien définies

Les sources du bruit sont nombreuses, on peut citer principalement : les émetteurs à haute fréquence, les décharges dans les contacts électriques, les décharges dans le transformateur d'alimentation, les décharges dues à la présence de particules conductrices près de l'endroit où est effectué le test.

Le bruit de fond est acheminé vers le détecteur à travers les connections de la source de haute tension ou de l'alimentation du circuit de détection ou par induction électromagnétique dans la boucle du circuit à tester.

En pratique la CEI préconise de mesurer le niveau du bruit sans tension et sous tension (à 10% et 50% d'un niveau de tension prédéfini) [CEI81].

La charge apparente :

Définition :

Lorsqu'une décharge se produit au sein d'une cellule d'étude constituée d'un matériau isolant placé entre deux électrodes, la quantité de charge libérée par la décharge se déplace dans l'espace inter-électrodes. Ce mouvement de charge sur une épaisseur de diélectrique induit une baisse de tension aux bornes de la cellule d'étude. Cette baisse de tension est compensée par la circulation d'une charge dans le circuit externe à la cellule. Cette charge,

transférée afin de maintenir constante la tension aux bornes de la cellule pendant la durée de la décharge, est appelée charge apparente.

Il existe une autre définition de la charge apparente. C'est celle donnée dans la publication de la CEI [CEI81]: La charge apparente est la charge qui, si elle était injectée instantanément aux bornes de l'objet en essai, changerait momentanément la tension entre les bornes de celui-ci de la même quantité que la décharge partielle elle-même.

Notons que la charge apparente n'est pas égale à la charge totale réellement libérée localement par la décharge, qui elle, ne peut pas être mesurée directement. La charge apparente est affectée par la géométrie des électrodes, par les propriétés intrinsèques du matériau ainsi que par toutes les capacités parasites qui entourent le montage de mesure.

Relation entre la charge apparente et la charge réelle :

En partant de considérations énergétiques et en se basant sur les calculs de Wetzer et al [Wet89], on peut exprimer le rapport entre la charge apparente et la charge réelle :

Considérons une source de tension V alimentant une cellule constituée de deux armatures planes séparées par un gaz (figure 4).

Lorsqu'une charge q parcourt une distance dx sous l'effet d'un champ électrique \vec{E} , le travail W effectué par celui-ci est fourni par la source :

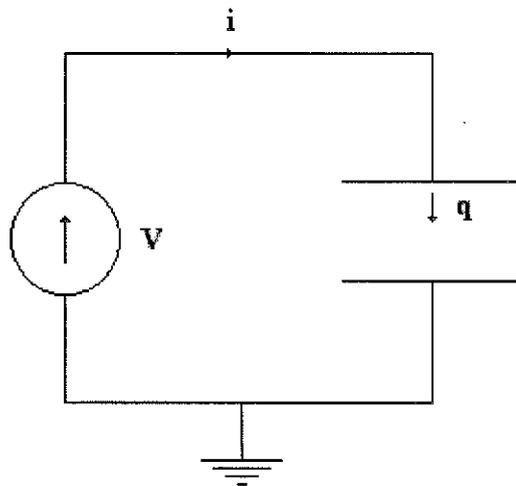


Figure 4. Circulation d'une charge dans un gaz entre deux armatures planes, d'après [Wet89]

On peut écrire les équations suivantes :

$$W = q\vec{E} \cdot d\vec{x} = iVdt$$

$$\text{avec } \vec{E} = E \cdot \vec{u} \text{ et } d\vec{x} = dx \cdot \vec{u}, \quad \|\vec{u}\| = 1$$

soit alors

$$i = \frac{qEdx}{Vdt} = q \frac{Ev}{V} \quad (\text{I-2})$$

v est la vitesse de déplacement de la charge q dans la direction du champ électrique \vec{E} .

Si à un déplacement Δx dans la direction de \vec{E} correspond une chute de tension ΔV , la charge apparente q_{app} qui circule dans le circuit externe sera donnée par :

$$q_{app} = \int_0^{\Delta t} i dt = \frac{q}{V} \int_0^{\Delta x} E dx \quad (I-3)$$

Soit alors :

$$q_{app} = q \frac{\Delta V}{V} \quad (I-4)$$

La charge apparente n'est qu'une fraction de la charge réelle libérée par la décharge.

Dans ce qui suit, nous modélisons la cellule d'essai par un ensemble de 3 condensateurs connu sous le nom de modèle a-b-c et dont le schéma est présenté ci dessous :

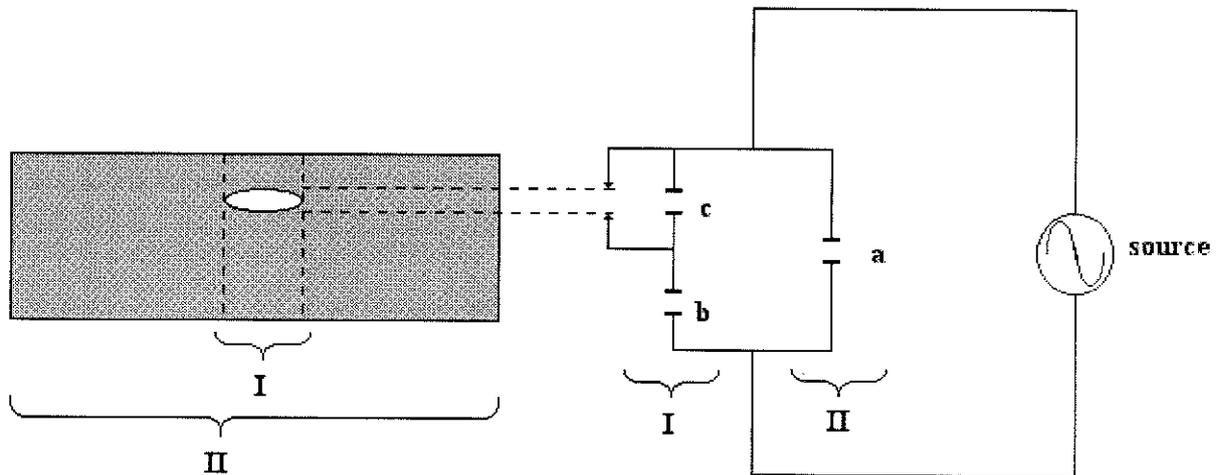


Figure 5. Modèle a-b-c appliqué à une cavité dans un solide d'après [Kre89]

c est la capacité de la partie du diélectrique où se produit la décharge, b représente le diélectrique en série avec le site de décharge et a représente la partie saine du diélectrique, en parallèle avec b et c (figure 5).

Si la tension V au bornes de la cellule reste constante tout le long de la durée de la décharge,
 $V = V_a = V_b + V_c$

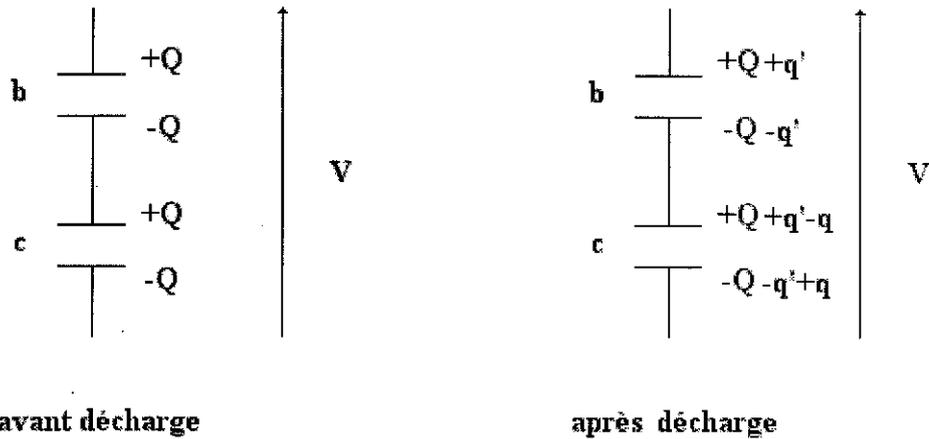


Figure 6. Répartition de la charge avant et après décharge dans c

Avant la décharge on a :

$$V = \frac{Q}{b} + \frac{Q}{c} \quad (\text{I-5})$$

Soit q la charge qui circule dans le condensateur c et q' la charge qui circule dans la branche b - c :

Après la décharge, la tension V s'exprime de la manière suivante :

$$V = \frac{Q+q'}{b} + \frac{Q+q'-q}{c}$$

Dans l'hypothèse où V reste constante:

$$q' = \frac{b}{b+c} q$$

Si $a \gg b$, on peut considérer que le temps de recharge du condensateur a est long vis à vis de la décharge partielle. Donc tout se passe comme si on enlevait la branche a du modèle a - b - c , on obtient alors : $q_{app} = q'$, soit :

$$q_{app} = \frac{b}{b+c} q \quad (\text{I-6})$$

On suppose maintenant que l'on injecte une quantité de charge q aux bornes de c et que cette charge va se répartir dans les différentes branches du circuit avec conservation de la charge.

Si la cellule d'étude est placée comme suit :

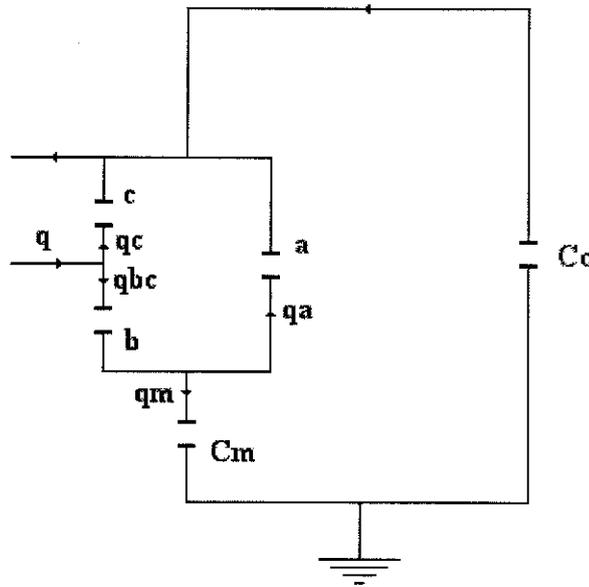


Figure 7. Répartition de la charge d'une décharge

C_m est la capacité de l'impédance de mesure et C_c est la capacité de couplage. C_{eq} est la capacité équivalente de C_m en série avec C_c . q_m est la charge qui passe dans C_m , q_a est la charge qui passe dans a, $q = q_c + q_{bc}$

On peut écrire :

$$\frac{q_m}{C_{eq}} = \frac{q_a}{a}$$

or $q_a = q_{bc} - q_m$ (loi des noeuds)

Soit alors :

$$\frac{q_m}{C_{eq}} = \frac{q_{bc} - q_m}{a} = \frac{q_{bc}}{C'_{eq}}$$

avec $C'_{eq} = a + C_{eq}$

soit $q_m = \frac{C_{eq}}{C'_{eq}} q_{bc}$

$$q_m = \frac{C_c C_m}{C_c + C_m} \frac{1}{a + \frac{C_c C_m}{C_c + C_m}} q_{bc}$$

or $\frac{q_c}{c} = \frac{q_{bc}}{b} + \frac{q_{bc}}{C'_{eq}}$

$$\frac{q_c}{c} = q_{bc} \frac{(b + C'_{eq})}{b C'_{eq}} = \frac{q}{c + \frac{b C'_{eq}}{b + C'_{eq}}}$$

$$\text{d'où : } q_m = \frac{bC_{eq}}{bC'_{eq} + bc + cC'_{eq}} q \quad (\text{I-7})$$

Si $b \ll C_m$ et $b \ll C_c$ alors $b \ll C_{eq}$ et $b \ll C'_{eq}$ soit alors :

$$q_m = \frac{C_{eq}}{C'_{eq}} \frac{b}{b+c} q$$

$$\text{d'où } q_m = \frac{1}{1 + \frac{a}{C_{eq}}} \frac{b}{b+c} q \quad (\text{I-8})$$

Fréquence de répétition des décharges partielles :

La fréquence de répétition des impulsions de décharges partielles, exprimée en impulsions par seconde, est le nombre moyen d'impulsions de décharges apparaissant durant un intervalle de temps déterminé [CEI81].

Tension d'apparition et d'extinction des décharges partielles:

En alternatif, ces tensions sont exprimées en valeur efficace.

Tension d'apparition des décharges partielles (TADP) [CEI81]:

Lorsque la tension appliquée est augmentée graduellement à partir d'une tension où on n'observe aucune décharge, la TADP est la tension au niveau de laquelle on commence à observer une récurrence de décharges.

En pratique, la CEI préconise de prendre la plus basse tension au delà de laquelle l'intensité d'une grandeur choisie liée aux décharges devient supérieure ou égale à un niveau seuil prédéfini.

Tension d'extinction des décharges partielles (TEDP) [CEI81]:

Lorsque la tension appliquée est diminuée graduellement à partir d'une tension où on observe une récurrence de décharges, la TEDP est la tension à laquelle ces décharges disparaissent.

En pratique, la CEI préconise de prendre la plus basse tension en dessous de laquelle l'intensité d'une grandeur choisie liée aux décharges devient inférieure ou égale à un niveau seuil prédéfini.

II. 2. b. 4. Grandeurs calculées :

Dans ce paragraphe, on considère que pendant une durée T, N décharges sont mesurées.

Courant moyen des décharges :

Le courant moyen I est la somme des valeurs absolues des charges des N décharges divisée par la durée T. Ce courant est exprimé en Coulombs par seconde et non pas en Ampères.

$$I = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N |q_i| \quad (\text{I-9})$$

Il est possible de distinguer entre courant moyen positif et courant moyen négatif.

Energie des décharges :

Une décharge isolée ne dépose qu'une quantité infime d'énergie dans l'isolant, mais les décharges peuvent être nombreuses et dans ce cas leur effet cumulatif peut conduire à la détérioration du matériau, d'où l'intérêt de considérer l'énergie des décharges.

Voici l'expression de l'énergie calculée :

$$E = \sum_{i=1}^N q_i V_i \quad (\text{I-10})$$

V_i est la tension appliquée à la cellule d'essai à l'instant où se produit la décharge dont la charge apparente est q_i

C'est l'énergie apparente fournie par le circuit externe lors de l'apparition des décharges dans le matériau. C'est une grandeur cumulative liée à la dégradation de l'isolant.

D'après la CEI [CEI81], on doit conserver le signe de chaque terme dans la formule. Si on divise E par la durée T on obtient la puissance des décharges. Cette puissance est exprimée en Watt.

Débit quadratique :

C'est la somme des carrés des charges apparentes des décharges divisée par la durée T. Cette grandeur donne un poids plus important aux décharges les plus intenses sans tenir compte de la tension appliquée.

$$D = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N q_i^2 \quad (\text{I-11})$$

D est exprimé en $(\text{Coulombs})^2$ par seconde.

II. 2. b. 5. Calibration de la mesure de la charge :

Elle consiste à injecter aux bornes de la cellule d'essai, des impulsions de courant brèves et de charge connue délivrées par un calibrateur selon le schéma de la figure 8.

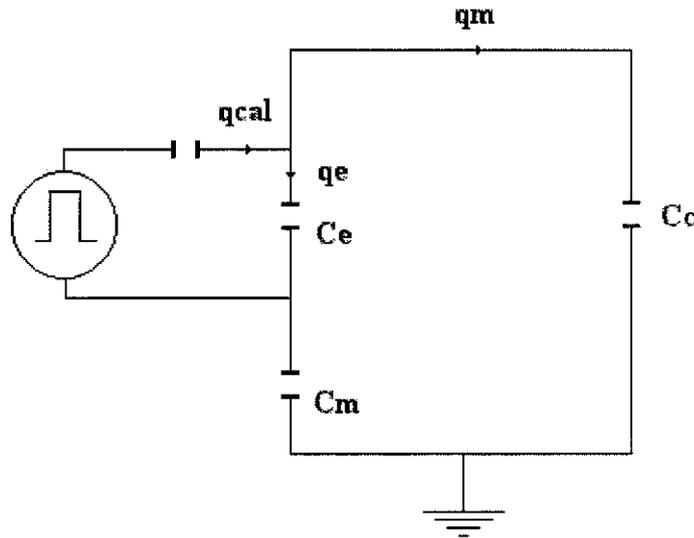


Figure 8. Calibration de la charge

Soit q_{cal} la charge délivrée par le calibrateur aux bornes de la cellule d'étude dont la capacité est C_e . Les mêmes notations du paragraphe (paragraphe II. b. 2. c de ce chapitre) sont conservées pour C_m , C_c , C_{eq} et q_m . q_e est la charge qui circule dans la cellule d'étude.

On a :

$$\frac{q_m}{C_{eq}} = \frac{q_e}{C_e} = \frac{q_m + q_e}{C_{eq} + C_e}$$

$$\text{d'où : } \frac{q_m}{C_{eq}} = \frac{q_{cal}}{C_{eq} + C_e}$$

$$\text{soit : } q_m = \frac{C_{eq}}{C_{eq} + C_e} q_{cal} \quad (\text{I-12})$$

La charge délivrée par le calibrateur étant connue, on en déduit alors un facteur de correction : $\frac{C_{eq}}{C_{eq} + C_e}$

III. TECHNIQUES NUMERIQUES D'ANALYSE DES DECHARGES PARTIELLES :

Après que de nombreux travaux ont été réalisés dans le domaine de la détection et de la mesure des décharges partielles, il est apparu que la prise en compte de grandeurs globales tel que le nombre total de décharges ou la charge globale enregistrée ne permettait pas une analyse plus fine des processus de décharges. La discrétisation des mesures a permis d'améliorer la connaissance des décharges partielles.

L'objectif de l'introduction des techniques numériques est de discrétiser la mesure des décharges afin d'enregistrer pour chaque décharge individuelle, sa charge apparente q_i , la valeur instantanée de la tension V_i à l'instant t_i et, en alternatif, la phase d'apparition Φ_i de la décharge sur l'onde de tension.

Le principe de base est l'utilisation, en sortie d'un détecteur de décharge classique, d'un convertisseur analogique/numérique et le choix d'une référence de temps en rapport avec la tension appliquée (passage par zéro de celle-ci par exemple).

Bartnikas a introduit en 1969 l'analyseur multicanaux [Bar69] en l'utilisant pour déterminer les distributions de l'amplitude des décharges $n(q)$ (en anglais *pulse-height distribution*) avec l'avantage que de telles distributions permettent d'accéder à l'énergie dissipée par les décharges.

D'autres types de distributions ont été introduits par la suite comme par exemple la distribution du nombre de décharges dans la phase $n(\Phi)$, par Kärkkäinen en 1976 [Kär76].

Tanaka et Okamoto [Tan78] ont mis au point un dispositif incluant un ordinateur, ce qui a permis de stocker un grand nombre de données et de les traiter. Ils ont étudié 3 types de distributions dont les distributions dans la phase du nombre et de l'amplitude des décharges.

Une mise au point sur les techniques actuelles ainsi qu'un historique sur l'introduction des techniques numériques dans l'étude des décharges partielles a été faite par Ward [War92].

IV. RECONNAISSANCE DES DEFAUTS:

IV. 1. Objectifs:

La mesure des décharges partielles représente un outil de diagnostic de l'état d'un appareil électrique soumis à la haute tension (cables, GIS, transformateurs...) [Gul92, Cha91, Sel94, Fuh93].

La mesure et la caractérisation des décharges peut permettre l'identification des défauts susceptibles d'apparaître dans un appareil (parasites, défauts de l'isolation comme par exemple la présence de bulles de gaz dans un liquide, d'une cavité dans un solide, d'objets métalliques au potentiel flottant, de particules, de pointes métalliques). La reconnaissance de ces défauts permet d'évaluer, sur site, l'état d'un appareil et d'estimer sa durée de vie, mais également de contrôler la qualité d'un appareil neuf. Ces tests doivent être non destructifs.

IV. 2. Procédures :

L'exploitation des mesures de décharges partielles ne peut aboutir à un tel résultat que par un choix judicieux des techniques de reconnaissance.

L'exploitation des mesures se fait à l'aide de diagrammes de décharges tels que les distributions dans la phase du nombre de décharges, de la charge moyenne ou les distributions $n(q)$. On peut également se baser sur la forme des impulsions de courant car il existe une relation directe entre les phénomènes physiques impliqués et la forme de l'impulsion [Kre94]. Mais cette méthode, contrairement à la précédente, présente l'inconvénient que les signaux peuvent être distordus notamment dans le cas des appareils à géométrie complexe (transformateurs). Ainsi son application est difficilement envisageable sur site industriel.

La procédure de reconnaissance englobe les étapes suivantes [Kri95]:

1. La mesure des décharges partielles sur l'échantillon test
2. La détermination des diagrammes de décharges
3. La comparaison des diagrammes obtenus à ceux relatifs à des défauts connus (utilisation d'une base de données)
4. La classification

Un exemple type de diagramme de décharges est la représentation des décharges sur une base de temps elliptique (en alternatif).

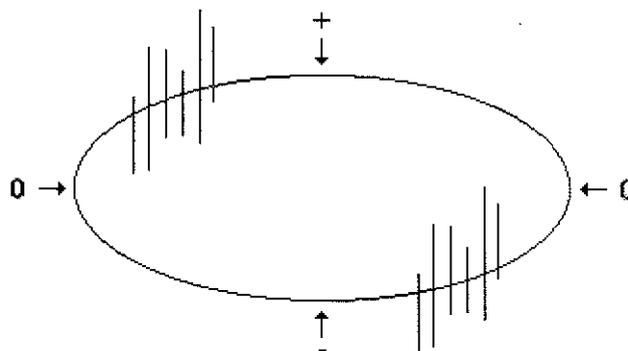


Figure 9. Représentation des décharges en mode XY

IV. 3. Reconnaissance par observation directe:

La méthode élaborée par la CIGRE [Cig69] est basée sur l'observation directe des diagrammes de décharges à l'aide d'un oscilloscope par un opérateur expérimenté. Ces diagrammes sont le plus souvent représentés en coordonnées X-Y (figure 9). L'observation doit se faire au moment de l'essai et non ultérieurement.

En plus des diagrammes de phase, on examine l'évolution de la charge maximale des décharges en fonction de la tension appliquée et de la durée d'application de cette tension.

D'autres facteurs peuvent également être pris en considération: effet de la pression, de la température.

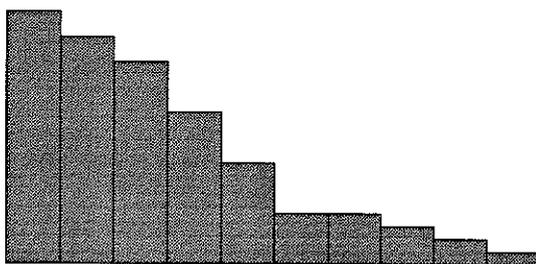
L'article de la CIGRE dresse une liste de contrôle contenant 16 catégories. Cette liste se présente sous forme d'un tableau. Pour chaque cas sont décrits: la variabilité des réponses, l'amplitude relative des décharges partielles sur les alternances + et - et enfin l'évolution de la charge en fonction de la tension d'essai et de la durée d'application de la tension. Un des cas décrits dans ce tableau peut correspondre à plusieurs types de défauts.

IV. 4. Reconnaissance par l'utilisation des coefficients statistiques portant sur les distributions des décharges:

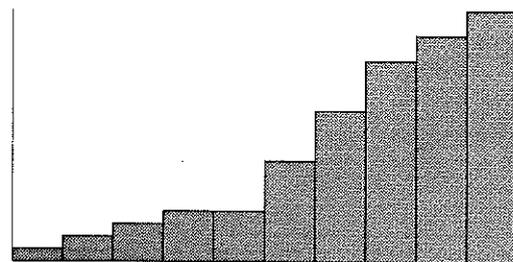
IV. 4. a. Signification des moments d'ordre 3 et 4 d'une distribution:

Moment d'ordre 3 ou Skewness (symétrie) :

Ce paramètre caractérise le degré d'asymétrie d'une distribution par rapport à sa moyenne. Il est positif lorsque la queue de la distribution s'étend vers la droite et négatif lorsqu'elle s'étend vers la gauche. Le Skewness d'une distribution gaussienne normale est nul [Pre89].



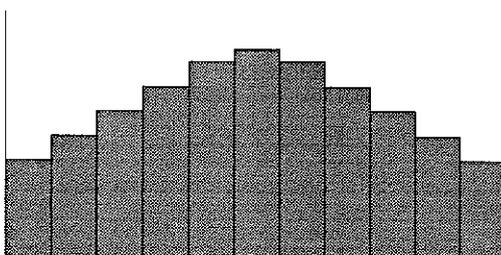
Skewness positif



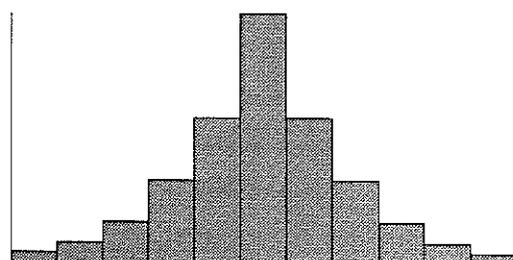
Skewness négatif

Moment d'ordre 4 ou Kurtosis (aplatissement):

Ce paramètre caractérise l'aplatissement de la distribution par rapport à une distribution normale. Pour ce type de distribution, le Kurtosis est nul. Un Kurtosis négatif signifie que la distribution est plus aplatie qu'une gaussienne normale. Un Kurtosis positif signifie que la distribution est plus pointue qu'une gaussienne normale [Pre89].



Kurtosis négatif



Kurtosis positif

IV. 4. b. Méthodes de reconnaissance:

La méthode basée sur le calcul de coefficients statistiques permettant de décrire la forme des distributions de décharges a été proposée par Tanaka et al en 1978 [Tan78]. En effet ces auteurs introduisent les moments d'ordre 3 et 4 (Skewness et Kurtosis) des distributions de décharges. Ils étudient la variation de ces coefficients en fonction de la tension appliquée et de la configuration des électrodes pour divers types de cavités. Ils obtiennent une corrélation entre la nature du défaut et l'évolution des moments d'ordre 3 et 4 en fonction de la tension appliquée [Tan80].

En 1985, Tatsuki et Tanaka [Tat85] étudient les décharges partielles lors du développement d'arborescences dans des isolants solides. Ils examinent l'évolution de la charge maximum par polarité en fonction du temps, de la longueur maximum de l'arborescence ainsi que du Skewness de la distribution $q(\Phi)$. Ils adoptent une méthode de suivi des Skewness avec une représentation dans un plan où l'axe des abscisses représente les Skewness des distributions positives et l'axe des ordonnées représente les Skewness des distributions négatives. Les auteurs concluent que, contrairement à la charge maximum, la représentation dans ce plan est un paramètre approprié pour le suivi du développement des décharges. Okamoto et Tanaka aboutissent aux mêmes conclusions en 1986 [Oka86].

Gulski et al proposent en 1992 une méthode automatique de reconnaissance des décharges partielles appliquée à des cavités cylindriques dans différents matériaux isolants [Gul92]. Leur étude est complétée en 1993 par une classification des décharges générées dans des modèles de défauts standards élaborés en laboratoire ou sur des maquettes contenant des défauts connus ou encore sur des appareils électriques [Kre93]. Ils utilisent les distributions $n(\Phi)$ et $q(\Phi)$. Ils calculent une quinzaine de coefficients statistiques dont les moments d'ordre supérieur. Dans une première étape, ils constituent une base de donnée contenant les empreintes d'un certain nombre de défauts standards (en anglais *fingerprint*) en déterminant pour chaque coefficient l'intervalle des valeurs les plus probables obtenues. Ils comparent ensuite l'empreinte d'un objet quelconque (défaut standard ou appareil) à celles de la base de données. Ils introduisent le taux de reconnaissance et le *centour score* comme outils de mesure du degré de similitude entre l'empreinte à reconnaître et celles contenues dans la base de donnée. Les résultats qu'ils obtiennent varient suivant la nature de l'objet test. En effet, un défaut standard est bien reconnu (auto-reconnaissance) alors que dans le cas des appareils électriques, leur méthode ne permet pas, à partir des acquisitions de décharges, de remonter de manière fiable au défaut qui les provoque.

Cette méthode est reprise dans la thèse de Krivda [kri95] où le nombre de coefficients passe à 29. D'autres méthodes de reconnaissance y ont été également testées.

Kranz et al [Kra92] introduisent de nouveaux paramètres de reconnaissance liés à l'énergie des décharges.

IV. 5. Méthodes diverses:

En 1995, Hücker et Kranz [Hüc95] testent différentes méthodes de reconnaissance des décharges sur des empreintes de défauts artificiellement introduits dans des postes isolés au gaz. Ils concluent que comparativement aux méthodes basées par exemple sur les réseaux de neurones ou sur les paramètres statistiques des distributions de phase, la méthode de classification par la distance L2 (distance euclidienne) minimum, appliquée sur les empreintes de décharges obtenues à partir de la décomposition en série de Fourier de la distribution de la charge moyenne dans la phase, $q(\Phi)$, est celle qui donne les meilleurs résultats (taux de reconnaissance satisfaisant, pas de rejet, similitude entre des défauts relativement proches).

En 1993, Satish et al [Sat93] notent une similitude entre les distributions des signaux de décharges et ceux de la parole. Partant de ce constat, ils mettent au point une méthode de reconnaissance des défauts fondée sur les modèles cachés de Markov, habituellement utilisés dans le domaine de la reconnaissance de la parole. Ils obtiennent des taux de reconnaissance élevés aussi bien avec les diagrammes de phase donnés par la CIGRE dans [Cig69] et par Natras dans [Nat88] qu'avec les signaux qu'ils ont eux même enregistrés. Néanmoins, lorsqu'un signal n'a pas déjà été répertorié, il est rejeté.

Cacciari et al [Cac96] ont utilisé une représentation par des fonctions de densité de probabilité de Weibull de la distribution de l'amplitude des décharges partielles pour différencier deux types de décharges créées par 2 cellules différentes placées en parallèle: pointe-plan dans l'air et décharges de surface dans l'air. Leur méthode permet une telle différenciation.

IV. 6. Utilisation des réseaux de neurones:

Depuis quelques années, de nombreux auteurs ont testé l'aptitude à la classification et à la reconnaissance des signaux de décharges, des réseaux neuronaux [Abd94].

En 1992, Suzuki et Endoh [Suz92] ont mis au point un réseau à 3 couches de neurones et l'ont appliqué au suivi des décharges partielles générées par une pointe métallique placée dans une cavité dans un solide diélectrique. Ils ont dans un premier temps réussi à séparer les signaux des décharges du bruit de fond. Ensuite, ils ont obtenu une corrélation entre l'évolution des sorties du réseau de neurone et le développement d'une arborescence dans le diélectrique. Quelques temps avant le claquage, une des sortie du réseau appelée alarme devient active.

La même année et avec le même type de réseau Hozumi et al [Hoz92] réussissent à détecter la présence d'arborescences générées par une pointe métallique dans une résine époxy. Cependant le succès de la méthode est intimement lié au stade de développement de l'arborescence. Aussi, lorsqu'il s'agit d'échantillons non utilisés dans l'apprentissage du réseau, les taux d'échec ou d'erreur de classification sont importants.

D'autres auteurs ont tenté de classer des cavités cylindriques en fonction de leur taille ou de leur position (près de l'électrode, entourée de diélectrique) [Yan92]. Ils ont injecté à

l'entrée d'un réseau multicouche à rétropropagation, les distributions de la charge moyenne dans la phase. Leur étude a mis en exergue certains inconvénients des réseaux de neurones tels que la lenteur de la reconnaissance, la lourdeur nécessaire pour améliorer la qualité de la reconnaissance.

Gulski et al [Gul293] se sont également intéressés à l'application des réseaux de neurones à la reconnaissance des décharges partielles. Ils ont utilisé 3 différents types de réseaux. Un perceptron multicouche, un réseau auto-organisateur de Kohonen et un réseau à vecteur d'apprentissage. La base de donnée ainsi que les coefficients servant à la reconnaissance sont ceux qu'ils ont précédemment utilisés [Gu92]. Le perceptron multicouche est le réseau qui donne les meilleurs résultats. Cependant pour les 3 types de réseaux, il y a une difficulté à étendre la reconnaissance à des défauts qui ne font pas partie de la base d'apprentissage. Des erreurs de classification peuvent survenir dans de tels cas. De plus, les temps d'apprentissage sont souvent longs (quelques heures). Les mêmes conclusions ont été faites par Krivda [Kri95].

Une méthode basée sur le perceptron multicouche a été également appliquée par Mazroua et al [Maz93] pour la classification des décharges en fonction de la taille et de la position de la cavité qui les a initiées. Les auteurs ont utilisé les caractéristiques des impulsions de courant de décharge comme grandeurs d'entrée du réseau classifieur. Les résultats sont très médiocres lorsque les cavités ont des tailles voisines. Les mêmes auteurs ont obtenu les mêmes résultats en utilisant d'autres structures de réseaux de neurones [Maz94].

Cachin et al [Cac95] ont souligné l'importance du pré-traitement des données pour l'optimisation de la reconnaissance par les réseaux de neurones. Ils ont introduit la méthode de validation croisée qui consiste à diviser dans un premier temps l'ensemble d'apprentissage en k sous-ensembles de même cardinal puis d'utiliser $k-1$ sous ensembles comme base d'apprentissage du réseau et tester le réseau avec le $k^{\text{ième}}$ sous-ensemble. L'opération est répétée k fois. Au vu des résultats obtenus, les auteurs insistent sur la nécessité d'adapter la taille du réseau à la complexité du problème.

Enfin Hong et al [Hon96] mettent au point un réseau de neurone modulaire (RNM) composé de 5 sous réseaux de type perceptron multicouche dont chacun est entraîné à la reconnaissance d'un seul type de décharge. Pour 5 types de sources de décharges différentes, ils injectent à l'entrée du réseau un vecteur formé par la concaténation des distributions statistiques $Q_{\text{moy}}(\Phi)$, $Q_{\text{max}}(\Phi)$ et $n(\Phi)$. Ils comparent les résultats obtenus avec un RNM et avec un réseau multicouche classique. Le RNM donne des taux de reconnaissance supérieurs avec des temps d'apprentissage plus faibles (ils restent cependant relativement longs).

De ces nombreuses études sur l'aptitude des réseaux de neurones à classifier les décharges partielles, des conclusions communes peuvent être tirées :

- Le perceptron multicouche est le type de réseau le plus adapté à ce genre de tâche.
- Le choix de la base d'apprentissage est fondamental.
- Plus le nombre d'exemples servant à l'apprentissage est important et le nombre de paramètres à l'entrée est grand, plus il y a de chance que le réseau puisse accomplir correctement la tâche qui lui est assignée et en même temps un nombre trop important de paramètres d'entrée alourdit la structure du réseau.
- La phase d'apprentissage est souvent lente, ce qui limite l'utilisation de ces réseaux.
- Les réseaux différencient mal des défauts similaires.
- Il y a une difficulté d'étendre la reconnaissance à des objets qui n'ont pas été utilisés lors de l'apprentissage ou dont les signaux caractéristiques sont trop éloignés de ceux de la base de données. Ainsi il y a risque d'erreur de classification.
- La quasi totalité des études qui ont été faites concernent des défauts de laboratoire, d'où la difficulté d'étendre ces résultats à des défauts dans les appareils.

IV. 7. Synthèse sur la reconnaissance des défauts :

Ce qui ressort de ce paragraphe est que l'essentiel dans la reconnaissance est la constitution d'une base de données réellement représentative des défauts. La phase de reconnaissance peut ensuite se faire par différentes méthodes de comparaison ou d'apprentissage. A l'état actuel, il n'existe pas de méthode universelle. Chaque méthode a ses limites. Dans la majorité des cas, les travaux présentés concernent des défauts artificiels dont les caractéristiques géométriques sont bien définies. Or une méthode ne vaut que si elle peut être appliquée en site industriel.

V. RAPPELS SUR LES PHENOMENES DE DECHARGES PARTIELLES

Les études sur les pannes dans les condensateurs de puissance à diélectrique solide imprégné, ont conclu qu'une des principales causes de la défaillance de ces appareils est l'apparition de décharges partielles initiées sur les bords d'armatures [Sar90]. Il est reconnu que ces appareils fonctionnant en 50 Hz vont claquer rapidement si des décharges s'y produisent de manière continue.

Les décharges se produisant dans le liquide d'imprégnation, nous présentons d'abord un aperçu bibliographique sur les phénomènes de conduction dans les diélectriques liquides en champ divergent. Nous faisons par la suite une synthèse des principaux travaux concernant la tenue sous haute tension des isolations imprégnées et plus particulièrement des condensateurs de puissance.

V. 1. Décharges partielles en pointe-plan dans un liquide :

Les phénomènes de conduction des liquides isolants sous champ intense sont le plus souvent étudiés dans la configuration pointe-plan. Cette configuration permet d'atteindre des champs très élevés sans grand risque de claquage.

V. 1. a. Champ électrique sur la pointe :

Le champ harmonique le long de l'axe de symétrie du système pointe-plan se calcule en assimilant la pointe à un hyperboloïde de révolution [Coe71]. En particulier, le champ électrique E_p sur la pointe (rayon de courbure de la pointe : r_p , distance entre l'extrémité de la pointe et le plan: d) est donnée par :

$$E_p = \frac{2V}{r_p \ln\left(\frac{4d}{r_p}\right)} \quad (\text{I-13})$$

V est la différence de potentiel entre la pointe et le plan.

V. 1. b. Résultats sur la conduction des hydrocarbures liquides en géométrie pointe-plan

La conduction des hydrocarbures liquides entre pointe et plan dépend fortement de la polarité de la pointe [Den88].

En tension continue, la polarité négative étant sur la pointe et pour des rayons de courbure de la pointe supérieurs à $0,5 \mu\text{m}$, dans le cyclohexane ou le n-décane, des décharges sont détectées dès une tension seuil correspondant à un champ à l'extrémité de la pointe d'environ $7 \pm 2 \text{ MV/cm}$ (à pression atmosphérique et à température ambiante). Ce champ est interprété comme étant un seuil de déclenchement d'avalanches électroniques en phase liquide. Ces décharges qui présentent de nombreuses analogies avec les impulsions de Trichel détectées lors d'effet couronne dans les gaz, ont été étudiées de façon assez systématique en fonction du rayon de courbure de la pointe, de la pression hydrostatique sur le liquide, de la tension, etc [Hai88].

En polarité positive sur la pointe, les phénomènes se produisent à des champs plus élevés (environ 50%), ils sont plus erratiques, leur fréquence est moins importante. Les phénomènes ont été peu étudiés dans cette polarité de la pointe.

Brouche [Bro93, Bro94] a étudié l'apparition de décharges dans cette géométrie dans différents liquides en tension alternative. Quand le liquide est un hydrocarbure saturé correctement purifié, des décharges sont détectées uniquement en polarité négative de la pointe pour des champs sur la pointe supérieurs à 5 MV/cm. Des décharges positives sont détectées aussi mais à des champs environ 50 % plus élevés.

Dans un liquide aromatique tel que le toluène, les résultats sont analogues à ceux du n-décane pendant les premiers instants de mise sous tension continue ou alternative. Mais la formation de polymère à la surface de la pointe influence fortement les phénomènes. Les impulsions disparaissent au cours de la mise sous tension et pour reproduire les phénomènes précédemment cités, il faut remplacer la pointe.

Dans le benzyl-toluène (BT : constituant majoritaire d'un imprégnant pour condensateur : le Jarylec), le champ seuil correspondant au régime de courant contrôlé par charge d'espace est aussi du même ordre de grandeur, environ $4,6 \pm 0,6$ MV/cm et ce pour une tension continue négative sur la pointe. Mais dans ce liquide aucune décharge supérieure à 0,1 pC n'a pu être détectée à cette valeur seuil. Il en est de même en tension alternative. Les premières impulsions sont détectées à des champs plus élevés, elles sont caractérisées par leur faible fréquence et leur apparition irrégulière, elles s'apparentent plus à des streamers qu'à des impulsions de Trichel. La charge moyenne des premières impulsions de courant est plus faible dans ce liquide que dans le n-décane (par exemple pour $r_p=2,5$ μm , la charge des impulsions est -0,6 pC dans le n-décane et -0,35 pC dans le BT).

En 1994, la conduction sous tension continue dans le benzyl-toluène (BT01) et le dibenzyl-toluène (BT02) a été étudiée en géométrie pointe-plan [McC94]. Les résultats de Brouche sont confirmés. Les caractéristiques courant-tension mesurées dans ces deux liquides sont semblables à celles relevées dans les liquides aliphatiques : il existe une tension seuil à laquelle le courant croît très vite avec la tension pour atteindre la valeur limitée par la charge d'espace, le champ seuil sur la pointe est évalué entre 2 et 4 MV/cm. A cette tension, on ne détecte pas de décharges mais de la lumière est émise car le courant est important. Les décharges ne sont détectées qu'en polarité négative et pour des tensions bien supérieures à cette tension seuil.

V. 2. Décharges partielles dans les condensateurs imprégnés :

V. 2. a. Le champ électrique en bord d'armature :

Dans la géométrie d'armature représentée sur la figure 10, il n'est pas aisé de déterminer l'expression analytique du champ électrique qui règne en un point quelconque du diélectrique en fonction des coordonnées spatiales de ce point.

Il existe néanmoins une méthode qui, partant de la géométrie plan-plan et par une série de transformations conformes, permet d'obtenir l'expression du champ électrique au point O de la figure ci-dessous [Kra67, Hey65]

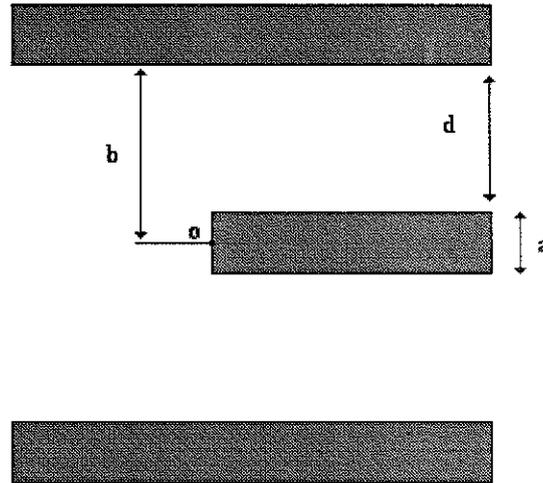


Figure 10. Géométrie bord d'armature d'un condensateur

L'expression du champ électrique au point O est:

$$E_0 = \frac{V}{d} \frac{d}{\sqrt{ab + b^2}} \approx E_{moy} \sqrt{\frac{d}{a}}$$

d est l'épaisseur de diélectrique, a l'épaisseur du métal, V la tension appliquée, a et b sont des paramètres géométriques montrés dans la figure 10. E_{moy} est le champ moyen dans le condensateur loin du bord de l'armature, $E_{moy} = \frac{V}{d}$.

Ce calcul ne tient pas compte de la variation de la permittivité électrique entre le solide (ϵ_s) et le liquide (ϵ_l). Quoique généralement faible, pour en tenir compte on peut considérer comme le suggèrent Fox et al [Fox68], que le solide a la même permittivité relative que le liquide mais une épaisseur d' telle que :

$$d' = d \frac{\epsilon_l}{\epsilon_s}$$

La formule du champ électrique sur le bord d'armature s'écrit alors de la manière suivante :

$$E_o = E_{moy} \sqrt{\frac{d}{a}} \sqrt{\frac{\epsilon_s}{\epsilon_l}} \quad (I-14)$$

V. 2. b. Phénomènes de conduction et décharges partielles dans les condensateurs imprégnés :

Les décharges partielles dans les condensateurs imprégnés ont fait l'objet de nombreux travaux compte tenu du danger qu'elles représentent pour les appareils.

Les caractéristiques d'ionisation et de vieillissement du diélectrique papier-huile des condensateurs ont été étudiées par Pintal en 1965 [Pin65]. Les phénomènes qu'ils nomment ionisation sont étudiés à l'aide d'un dispositif photoélectrique. Ils se manifestent d'abord sous forme de points lumineux isolés sur les bords d'électrodes et s'étendant sur quelques μm dans le volume de l'huile. La luminescence apparaît uniquement sur les électrodes à la polarité négative. Cette ionisation initiale agit sur l'huile en augmentant sa teneur en gaz, préparant ainsi lentement les conditions de transition vers une ionisation à caractère critique qui provoque, dans un délai de quelques minutes, la perforation du papier.

Kutchinsky et al [Kut66] ont montré que dans les condensateurs au papier imprégné d'huile minérale, des décharges de faible intensité et des points lumineux apparaissent simultanément sur les bords des électrodes. Ils ont constaté que le champ électrique correspondant à l'apparition de ces décharges diminuait lorsque l'épaisseur de papier était augmentée.

Krasucki [Kra67] démontre à partir des résultats qu'il obtient dans une structure de condensateur avec du polystyrène imprégné d'huile paraffine ou de silicone que les décharges apparaissent sur les bords d'armature lorsque le champ électrique y atteint une valeur critique. Ceci provoque le claquage du liquide près du bord d'armature et la formation de bulles qui vont être le siège de décharges partielles. L'auteur calcule, à l'aide de transformations conformes, le champ électrique qui règne sur l'armature métallique. Pour un champ électrique donné dans la région plane parallèle du condensateur, le champ sur le bord de l'armature varie comme la racine carrée de l'épaisseur du diélectrique, ce qui est en accord avec ses résultats expérimentaux.

Fox et al [Fox68] se sont eux aussi intéressés au renforcement du champ électrique sur le bord des armatures dans les condensateurs et aux conditions d'initiation de décharges. Leurs calculs sont basés sur l'hypothèse qu'une décharge se produit là où le champ dépasse une certaine valeur critique sur une distance suffisante. Dans un condensateur au papier imprégné d'huile de ricin, ils trouvent des champs seuils de 2,6 à 2,9 MV/cm sur les bords d'armature correspondant à des chutes de tension de plusieurs centaines de volts sur une distance de quelques μm dans le liquide.

Les mêmes auteurs mettent en évidence l'existence de 3 types de décharges : un premier type de décharges de très faibles intensités apparaissant de manière sporadique et non confinées à une portion particulière de l'onde de tension. Ces décharges appelées décharges

du type I disparaissent si la tension est maintenue constante. Les décharges du second type ou décharges de type I-II apparaissent sur les fronts montants de chaque demi-cycle de l'onde de tension. Elles ont des amplitudes stables. La tension d'extinction de ces décharges n'est que très légèrement inférieure à leur tension d'apparition. Selon les auteurs, ces décharges ont lieu dans les bulles créées par les avalanches se produisant dans la zone de champ fort près du bord des armatures et qui disparaissent rapidement. Les décharges du dernier type ou décharges de type II ont des amplitudes qui augmentent rapidement et ont une tension d'extinction nettement plus faible que leur tension d'apparition. Ces décharges se produisent dans des bulles de gaz et provoquent une augmentation de la quantité de gaz.

Nemamcha [Nem93] a mesuré les décharges partielles dans des modèles de condensateur plan tout-film imprégné de décane ou de monobenzyltoluène (MBT). La tension d'apparition des décharges est d'environ 5 kV dans le décane alors que dans les mêmes conditions elle est de 7,5 kV dans le MBT. Par contre, les charges mesurées dans le MBT sont plus faibles que celles obtenues dans le décane. Ceci est attribué à l'aromaticité du MBT (rapport du nombre de carbones aromatiques sur le nombre total d'atomes de carbones) qui améliore la tenue d'un diélectrique liquide sous haute tension [Nuc85].

Hantouche a mesuré les décharges partielles dans des condensateurs de puissance tout-film industriels et donc de capacité importante (2,4 μF). Ces condensateurs ont été soumis à des tests de surtension et à des essais de vieillissement. La tension d'apparition des décharges définie comme la tension au dessus de laquelle des décharges valent plus de 20 pC, augmente au cours de l'essai de surtensions. Elle vaut environ 2,6 fois la tension nominale U_n en début d'essai et atteint environ 3 fois cette valeur après 1275 surtensions.

Par contre, cette tension (TADP) décroît assez régulièrement lors d'un vieillissement (75°C, 1,4 U_n). Elle vaut 2,6 U_n avant l'essai, 2,5 U_n après 1900 h, 2,4 après 2735 h, et 2,2 après 3000 h.

Enfin, la TADP dépend beaucoup de la température du condensateur. Cette tension décroît d'environ 10000 V à +15 °C à 7100 V à -25 °C.

V. 2. c. Evolution d'une cavité gazeuse dans un liquide imprégnant sous tension :

Un des critères de sélection d'un liquide imprégnant est le comportement de bulles de gaz en son sein quand des décharges s'y produisent. C'est la propriété de *gassing*. On parle de *gassing* positif lorsque le volume de la bulle de gaz augmente au cours du temps et de *gassing* négatif dans le cas contraire.

Le *gassing* est causé par les décharges qui se produisent à l'intérieur de la cavité gazeuse et qui y provoquent des réactions chimiques. Il a fait l'objet de nombreuses études qui ont porté sur la nature des gaz formés par les décharges ainsi que le comportement de bulles de gaz sous tension.

Selon Basseches et Mc Lean [Bas55], le gaz créé par des streamers dans les liquides sera principalement de l'hydrogène et dans une proportion plus faible, des hydrocarbures de faible poids moléculaire. Les auteurs soulignent en outre l'effet de l'adjonction de composés aromatiques dans l'huile qui inhibe fortement la production de gaz.

En 1976, Mathes [Mat76] s'est intéressé à la relation entre l'évolution du gaz dont il analyse la composition et le comportement du papier imprégné d'huile sous haute tension. Le gassing d'un liquide (sa propriété d'absorber ou non les gaz produits par les décharges) est lié à son aromaticité. C'est la compétition entre production et absorption de gaz qui va conditionner la tenue du diélectrique.

Meyrueix [Mey80] met en évidence la production de gaz sous champ électrique intense pour de nombreux liquides imprégnants dans la géométrie bord d'armature. Il retrouve par analyse des gaz formés que l'hydrogène est le gaz produit en plus grande quantité. Meyrueix observe l'apparition au delà d'une tension seuil de décharges ramifiées qui partent des bords d'armature et qui s'étendent jusqu'à quelques mm du bord. Il trouve comme d'autres auteurs [Kra67, Fox68, Hey65] que la tension de génération de gaz V_G est proportionnelle à la racine carrée de l'épaisseur de diélectrique. Il montre également que lorsque la fréquence de la tension appliquée augmente (à partir de 5 Hz), V_G diminue puis reste constante au delà de 300 Hz. Le même résultat a été retrouvé par Lesaint et al [Les83]. Cet effet de la fréquence est attribué au rôle de la charge d'espace qui diminue le champ électrique près du bord d'armature. Meyrueix étudie également l'effet de la résistivité du liquide. Ainsi dans le néo caprate de benzyle (BNC) à 50 Hz, la tension de génération du gaz passe de 4100 à 7500 Volts lorsque la résistivité du liquide diminue de $10^{12} \Omega\text{cm}$ à $1,8 \cdot 10^9 \Omega\text{cm}$. Il constate que ni la tension appliquée ni la température n'ont d'influence sur le gassing. Par contre, le gassing est de plus en plus positif avec des liquides de plus en plus visqueux.

L'auteur a aussi visualisé par strioscopie le comportement des bulles sur les bords d'armatures. Il observe en fonction de la tension appliquée l'allongement, la fragmentation de la bulle, la vibration de sa paroi, la pulvérisation de microbulles. Il souligne l'existence de deux phénomènes antagonistes : la force diélectrophorétique qui repousse la bulle loin du bord d'armature et la force coulombienne (agissant lorsque la bulle est siège de DP) qui attire la bulle vers le bord d'armature.

CHAPITRE II

DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

CHAPITRE II

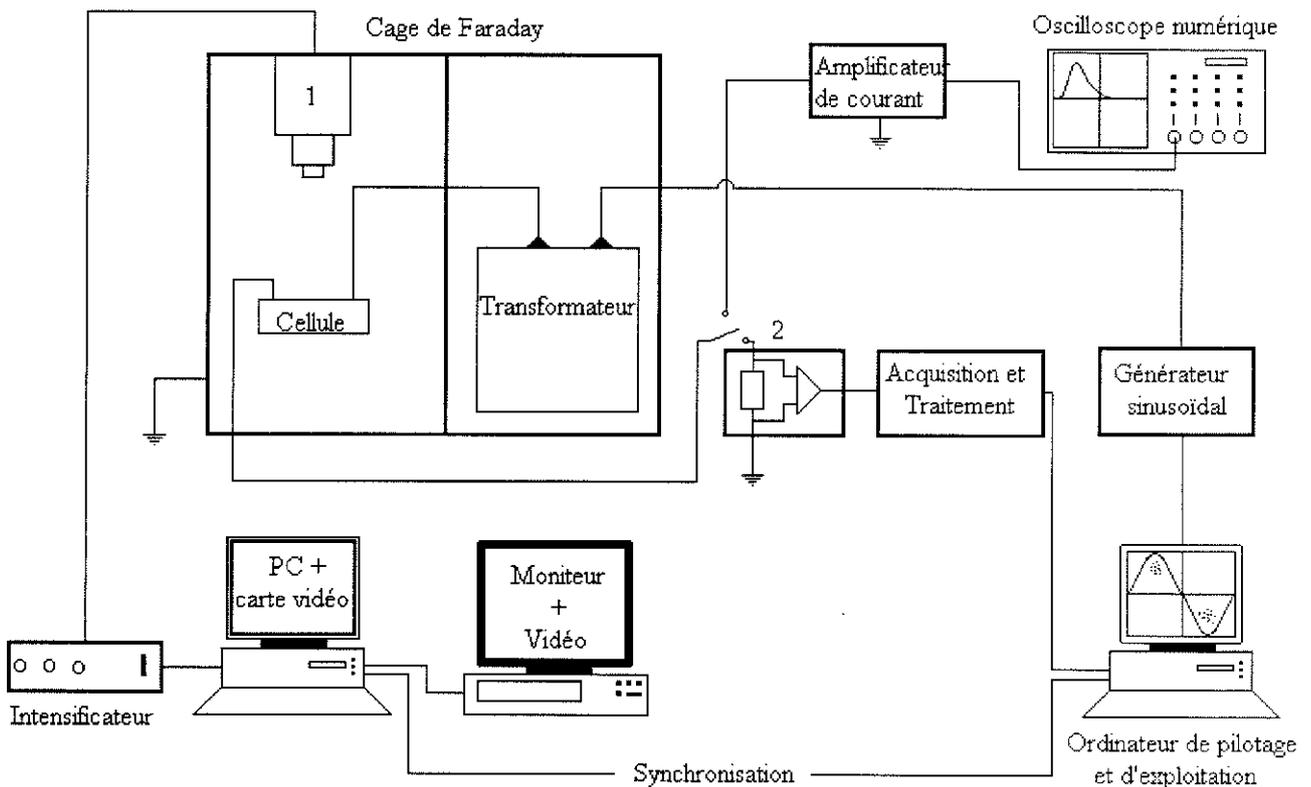
Dispositifs expérimentaux

Notre dispositif de détection et de mesure des décharges partielles (D.P.) utilise les manifestations électriques et optiques des D.P : lorsqu'une décharge partielle apparaît dans la cellule d'étude, un courant apparent circule dans le circuit externe. L'activité de la D.P. s'accompagne également d'une émission de lumière [Kre89].

I. PRESENTATION DU DISPOSITIF

L'ensemble du dispositif est représenté dans le schéma de la figure 1. Il comprend :

1. une source de haute tension alternative
2. une cage de Faraday
3. un ensemble de détection et de mesure électrique des décharges partielles
4. un montage de visualisation de la lumière émise par les décharges



- 1: Caméra CCD
- 2: impédance de mesure et amplification

Figure 1. Schéma synoptique du dispositif expérimental

Nous présentons dans ce qui suit les cellules d'essais, les dispositifs de remplissage de ces cellules, les dispositifs de détection, de mesure et de traitement des décharges partielles utilisés durant nos travaux et qui ont été réalisés au sein de notre laboratoire.

Nous consacrons également une partie de ce chapitre à la description des logiciels d'acquisition et de traitement des décharges partielles.

Nous présentons également les autres dispositifs qui nous ont permis de réaliser ce travail tels que le dispositif de visualisation de la lumière émise par les décharges et le dispositif de vieillissement.

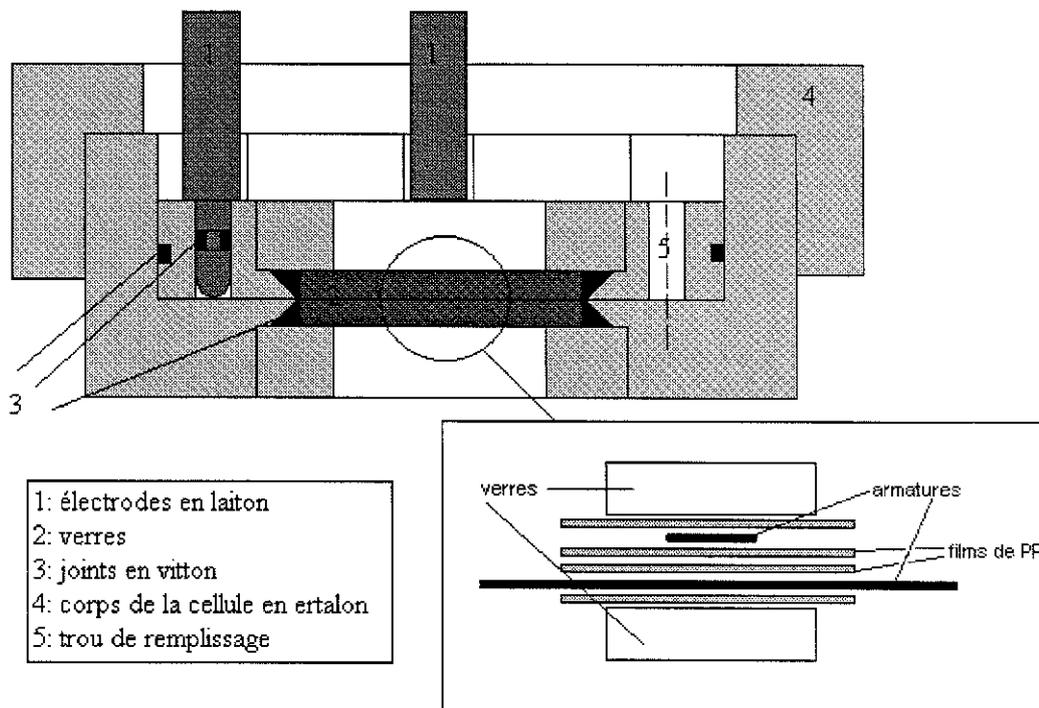
Enfin, la dernière partie illustre les principaux tests effectués dans le but d'évaluer les performances de notre dispositif.

II. CELLULE D'ETUDE ET MATERIAUX UTILISES

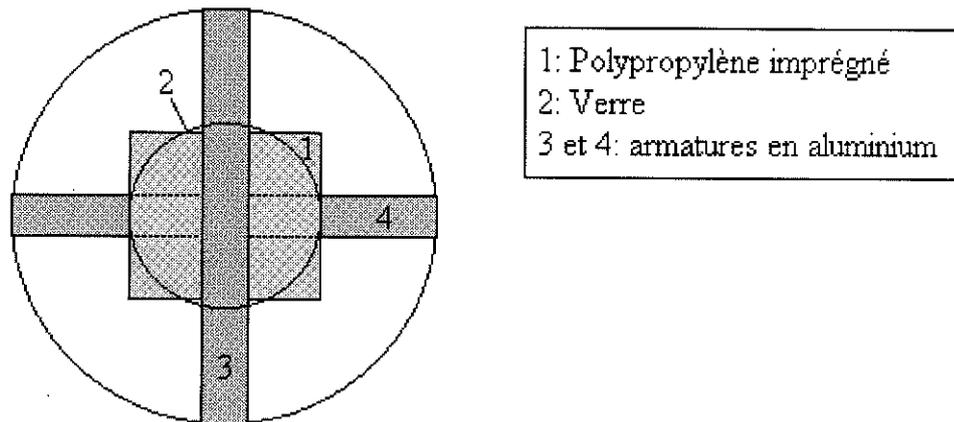
II. 1. La cellule d'étude:

La cellule d'étude est un modèle de condensateur tout-film imprégné. Elle est constituée d'un corps en matériau plastique (Ertalon ou Téflon) à l'intérieur duquel 2 rubans d'aluminium sont disposés à 90° et séparés par des films de polypropylène. Les deux rubans d'aluminium ont une largeur comprise entre 8 et 10 mm et une épaisseur de 6 μm . Leurs bords peuvent être repliés. Dans le cas le plus fréquent, le diélectrique est constitué de 2 films de polypropylène rugueux de 13,6 μm d'épaisseur pondérale chacun. Nous avons également effectué des essais avec 1, 3, 4 et 5 films de 13,6 μm ou avec un seul film de 100 μm . L'ensemble est pressé entre 2 verres afin de rendre possible la visualisation des phénomènes qui se produisent sur les bords d'armatures. La cellule d'étude est remplie d'un liquide diélectrique. Dans la plupart de nos essais, le liquide utilisé pour l'imprégnation est le Jarylec C100 utilisé dans les condensateurs de puissance, un mélange de mono et de di benzyl-toluène fabriqué par la société ELF Atochem (chapitre II.3).

Les schémas de la cellule en coupe et en vue de dessus sont présentés ci dessous (figure 2). Le schéma en coupe est réalisé à l'échelle 1.



(a) Vue en coupe transversale



(b) vue de dessus

Figure 2. Schéma de la cellule d'étude avec (a) vue en coupe et (b) vue de dessus

II. 2. Le polypropylène:(PP)

Le polypropylène est un matériau plastique non polaire (bon isolant électrique par conséquent) ayant de bonnes propriétés mécaniques et thermiques (température d'utilisation maximum: 140 à 147 °C). Il est obtenu par polymérisation du propylène (C_3H_6) [Füz91]. La formule générale est la suivante:

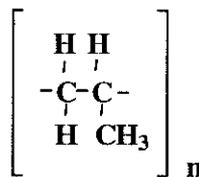


Figure 3. Motif de polypropylène

Suivant que les groupes méthyles sont ordonnés ou non le long de la chaîne du polymère, le polypropylène peut être :

1. isotactique: les groupes méthyles sont tous du même coté
2. syndiotactique: les groupes méthyles sont alternativement d'un coté et de l'autre
3. atactique: les groupes méthyles sont disposés de façon aléatoire

Le polypropylène utilisé dans l'industrie a un taux d'isotacticité de l'ordre de 92% à 98%. Il est utilisé sous forme de films bi-orientés (bi-étirés à chaud) afin d'augmenter sa résistance à la rupture. Un antioxydant est ajouté aux films afin d'augmenter leur résistance à l'oxydation.

Dans les condensateurs de compensation de phase, l'utilisation du polypropylène a permis d'augmenter sensiblement les gradients d'utilisation et la puissance réactive unitaire des condensateurs [Han97 et annexe 1]. Les films qui y sont utilisés ont des surfaces rugueuses afin de faciliter leur imprégnation.

Quelques propriétés du polypropylène sont rappelées dans le tableau suivant:

Permittivité relative (ϵ_r)	ne varie pas avec la fréquence: 2,2
Angle de pertes ($\tan\delta$) [Seg97]	ne varie pas avec la fréquence: 1 à $2 \cdot 10^{-4}$
Résistivité transversale ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$> 10^{16}$
Rigidité diélectrique (MV/m)	200 à 400 d'après [Füz91] et 700 d'après [Seb89]
Température de fusion ($^{\circ}\text{C}$)	160 à 170
Température de ramollissement Vicat, pour 1 Kg	150 à 155
Masse volumique ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0,905
Conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0,22

Tableau 1. Propriétés du polypropylène, d'après [Füz91], [Seg97] et [Seb89]

II 3. Le Jarylec :

C'est un mélange de mono-benzyltoluène (environ 65%) de formule chimique $\text{C}_{14}\text{H}_{14}$ et de di-benzyltoluène de formule chimique $\text{C}_{21}\text{H}_{20}$. Il y a également des traces de tri-benzyltoluène [Pro83].

Ce liquide a été introduit comme isolant dans l'industrie électrotechnique au début des années 80. Son écotoxicité est nettement plus faible que celle des liquides chlorés, précédemment utilisés dans la fabrication des condensateurs. De plus, ses principales propriétés tels que son haut degré d'aromaticité (0,65) et son gassing positif, lui confèrent une bonne tenue sous décharges. Il a également une bonne compatibilité avec le polypropylène.

Les propriétés essentielles de ce liquide sont résumées dans le tableau ci dessous:

Permittivité relative (ϵ_r) (à 25°C)	2,66
Angle de pertes ($\tan\delta$) (50 Hz et 100°C)	$< 4 \cdot 10^{-3}$
Résistivité ($\Omega \cdot \text{cm}$) (100°C)	$> 9 \cdot 10^{14}$
Rigidité diélectrique (MV/m)	0,35
Température d'ébullition ($^{\circ}\text{C}$)	280°C pour le MBT et 380°C pour le DBT
Point de feu ($^{\circ}\text{C}$)	170
Point d'écoulement ($^{\circ}\text{C}$)	-55
Masse volumique ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1
Taux de gassing d' H_2 (cm^3/h)	2,3 (Test Pirelli)
Viscosité à 20°C (cSt)	6,5

Tableau 2. Propriétés du Jarylec, d'après [Ber86] et [Pro83]

II. 4. L'imprégnation de la cellule d'étude:

Le dispositif d'imprégnation est schématisé sur la figure 4.

L'imprégnation a pour rôle de remplir les éventuelles poches d'air présentes dans le diélectrique afin d'éviter l'amorçage de décharges partielles à des tensions relativement basses. Notre procédure d'imprégnation est calquée sur celle des condensateurs industriels.

La cellule d'étude est montée à sec dans une hotte à flux laminaire. La cellule est ensuite serrée puis placée dans une enceinte en verre dans laquelle on réalise un vide d'environ $1 \text{ à } 2 \cdot 10^{-4}$ bar à l'aide d'une pompe. Le liquide d'imprégnation est contenu dans un récipient situé au dessus de l'enceinte renfermant la cellule. Ainsi le liquide est dégazé lors du pompage. Lorsque le liquide est bien dégazé et que la pression dans l'enceinte atteint la valeur désirée, le liquide est introduit dans la cellule sous vide statique à l'aide d'un entonnoir placé dans un des trous de remplissage de la cellule. L'imprégnation dure au minimum 16 heures.

La mesure de la capacité avant et après le remplissage de la cellule d'étude permet de vérifier son degré d'imprégnation. Cette mesure permet également d'estimer le facteur d'espace dans la cellule (épaisseur de la couche de liquide située entre les deux armatures et s'ajoutant à l'épaisseur des films de PP, voir annexe 3).

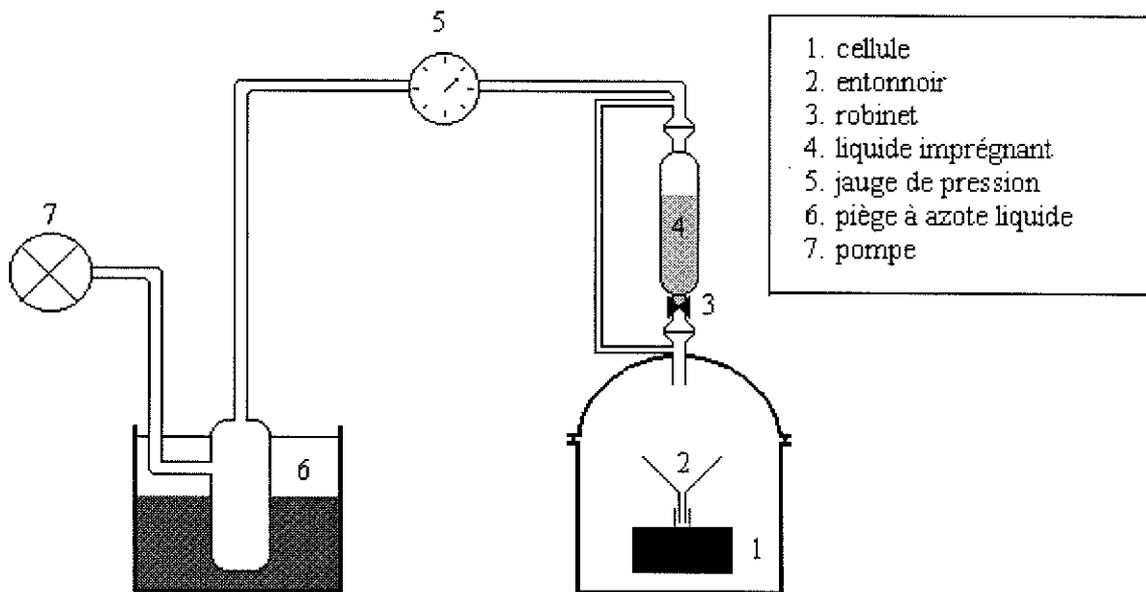


Figure 4. Dispositif d'imprégnation des cellules

III. DISPOSITIF D'APPLICATION DE LA TENSION ET DE MESURE DES DECHARGES PARTIELLES

III. 1. La source de tension:

Un générateur numérique de tension alternative sinusoïdale de fréquence variable (25 à 100 Hz) et d'amplitude variable commandé par un micro-ordinateur de type PC alimente le primaire d'un transformateur élévateur de tension (100 VA, 20000 V) (voir figure 1). La valeur efficace de la tension au secondaire est volontairement limitée à 12,5 kV_{eff} afin d'éviter les décharges partielles dans le transformateur.

III. 2. La cage de Faraday:

Notre dispositif de détection et de mesure des décharges partielles a une très grande sensibilité. Il est donc souhaitable d'avoir un niveau de bruit suffisamment faible afin de l'utiliser au meilleur de sa sensibilité.

La cage de Faraday est composée de 2 compartiments distincts (figure 1). Le transformateur est placé dans un des deux compartiments, la cellule d'étude est placée à l'intérieur de l'autre compartiment. Une des bornes de la cellule est connectée à la sortie HT du transformateur. La seconde borne est reliée à une prise BNC sur laquelle on branche la tête de mesure du système de détection des décharges partielles. Un soin particulier est apporté dans la réalisation de la connexion électrique reliée à la haute tension afin d'éviter les décharges parasites dues aux effets de pointe. Un diviseur capacitif sur le secondaire du transformateur permet de contrôler la valeur de la tension appliquée.

III. 3. Caractéristiques du mesureur:

La sensibilité de mesure de notre dispositif dépend de la capacité de la cellule d'étude. Pour une sensibilité donnée, la chaîne de mesure a une dynamique de 32 dB. Par exemple, pour la sensibilité maximum, l'appareil mesurera des décharges dans l'intervalle [0,05-2 pC]. Pour la sensibilité minimum, cet intervalle est [50-2000 pC]. Il est ainsi possible, en faisant varier la sensibilité de mesure lors d'un essai, d'effectuer des mesures sur une plage d'environ 92 dB.

La durée minimum entre deux décharges successives est de 330 ns. Lorsqu'une impulsion est détectée, son amplitude, sa polarité ainsi que l'instant de son apparition sont mesurés (ce qui permet de déduire la phase de la décharge, c'est à dire sa position sur l'onde de tension qui est divisée en $65536=2^{16}$ intervalles de même longueur).

Ce mesureur a été conçu par C. Marteau, Ingénieur Electronicien au LEMD. Le logiciel qui sera présenté plus loin a été développé par J. P. Roux, Ingénieur au LEMD.

III. 4. Fonctionnement du mesureur:

III. 4. a. Filtrage du courant et amplification du signal: (figure 5)

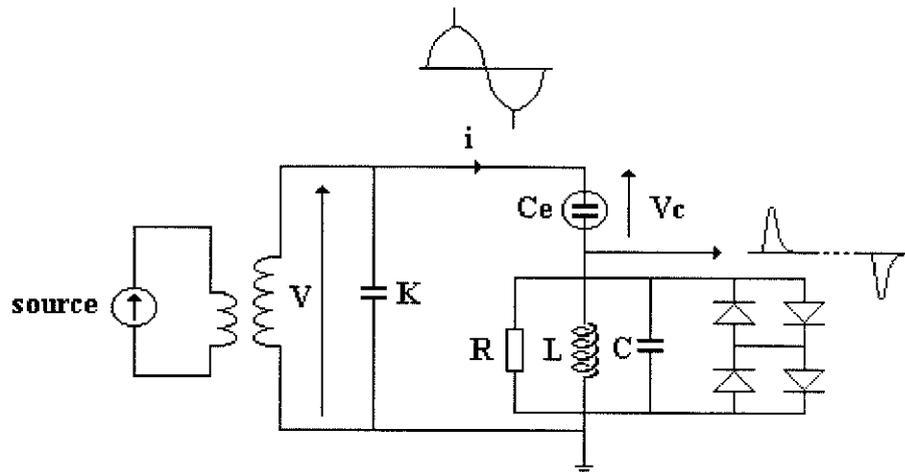


Figure 5. Impédance de mesure du détecteur de D.P. (K : capacité de couplage de 80 pF). Les allures des courants dans la cellule d'étude et en sortie de l'impédance de mesure sont représentées.

L'impédance d'entrée de la tête de mesure ($R//L//C$), avec $R=100\ \Omega$, $L=100\ \mu\text{H}$ et $C=400\ \text{pF}$, supprime la composante basse fréquence du courant i (voir paragraphe II. b. 2. b du chapitre I).

Les impulsions de courant sont intégrées par le condensateur C de la tête de mesure. Elles sont fortement amorties ($RC=40\ \text{ns}$). La durée du pic de courant réel est bien inférieure à cette constante de temps, ce qui signifie que lorsque le condensateur de la tête de mesure commence à se décharger, il a déjà acquis la totalité de la charge de la D.P.

Quatre diodes de type 1N4148 montées 2 à 2 en parallèle, tête-bêche, sont placées aux bornes de l'impédance de mesure afin de protéger la chaîne de mesure d'éventuelles décharges trop intenses.

Le signal est injecté à l'entrée d'un amplificateur, large bande, faible distorsion, à gain variable (80 dB maximum) et à faible bruit (densité spectrale du bruit : $1,4\ \text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, soit $2,4\ \mu\text{V}$ à 3 MHz, ce qui donne un niveau de bruit à l'entrée de 24 nA car l'impédance d'entrée est de $100\ \Omega$). Le réglage de la sensibilité de mesure se fait par l'intermédiaire du clavier de l'ordinateur.

III. 4. b. Détection crête de l'impulsion: (figure 6)

Le signal est mis en forme par un amplificateur logarithmique (gain élevé et large bande: 120 MHz) qui fournit en sortie, un signal proportionnel au logarithme de la valeur absolue du signal d'entrée. Cette opération permet de compresser l'amplitude des signaux afin d'en réduire la gamme de variation et faciliter la détection de leur valeur crête.

Après sa mise en forme, l'impulsion passe par un dérivateur suivi d'un comparateur à zéro, ce qui permet de détecter avec précision le passage par zéro de la dérivée du signal.

Lorsque le pic est détecté, une impulsion est envoyée vers une bascule qui transmet l'ordre de début de conversion à un convertisseur analogique/numérique 10 bits. La fréquence de ce convertisseur est de 18 MHz soit un temps d'échantillonnage de 56 ns.

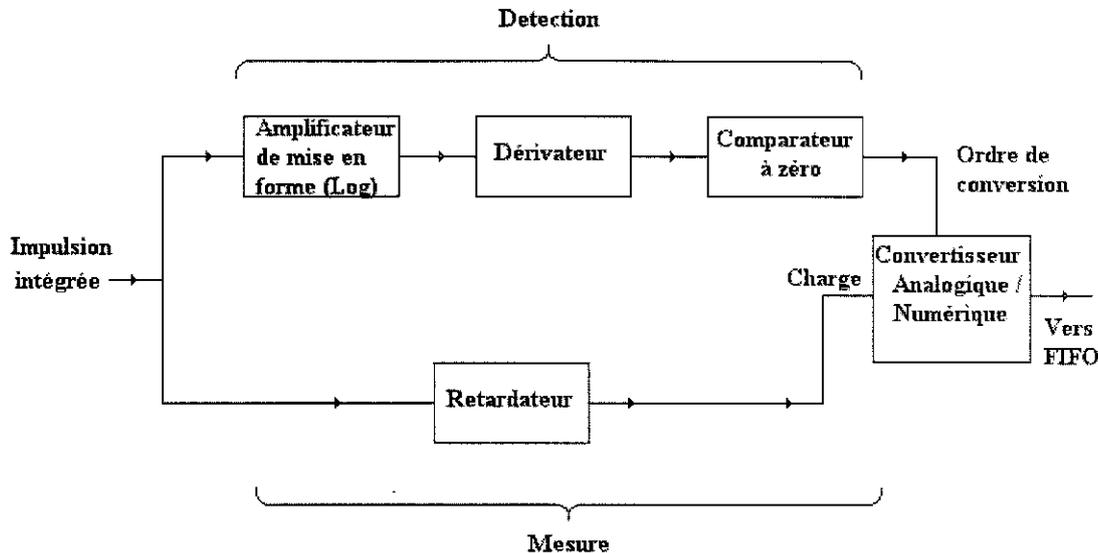


Figure 6. Détection d'une décharge partielle et mesure de son amplitude

III. 4. c. Mesure de l'amplitude et du signe de la décharge: (figure 6)

Le signal impulsionnel intégré issu de la tête de mesure passe par un circuit retardateur, ce qui permet de faire coïncider l'arrivée de l'information à l'entrée du CAN avec la réception de l'ordre de début de conversion. Une entrée du convertisseur est attaquée par le signal retardé. 9 bits sont réservés à l'intensité de la décharge (ce qui fait 2^9 , soit 512 niveaux pour la valeur absolue de la charge). Le dixième bit est réservé au signe de la décharge.

Des potentiomètres permettent de régler la symétrie de mesure entre les décharges positives et les décharges négatives.

III. 4. d. Temps: numéro du cycle et position dans le cycle de la décharge:

L'horloge de l'oscillateur a une fréquence de 19,8 MHz, celle-ci est divisée puis va servir à incrémenter deux compteurs placés en boucle (un pour le n° de cycle, l'autre pour le n° de position dans le cycle). Lorsqu'une impulsion est détectée, un signal est envoyé afin de déclencher l'enregistrement de la position des compteurs dans une mémoire FIFO à l'instant de détection.

III. 4. e. Interface avec l'ordinateur:

Les informations en sortie du CAN sont transmises vers une mémoire tampon FIFO pouvant contenir jusqu'à 4000 décharges. Chaque décharge est représentée sur 13 bits (9+1 pour la charge, 1 bit pour les dépassements éventuels, 1 bit pour les décharges intermédiaires, 1 bit pour les surtensions).

Le contenu des FIFO est transmis vers le micro-ordinateur, les informations sont alors présentées sous forme de tableaux.

IV. LOGICIELS D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT

IV. 1. Logiciel d'acquisition des décharges partielles:

Le logiciel d'acquisition des décharges partielles fonctionne sous environnement MS-DOS. Il permet de sélectionner les paramètres d'une expérience: tension appliquée, fréquence de l'onde de tension, sensibilité de mesure, durée de l'acquisition.

La tension appliquée lors de l'acquisition peut être choisie directement lors de la sélection des paramètres de l'expérience. On peut également monter manuellement la tension à partir de zéro par palier de 50 V. Avant chaque acquisition, on effectue une calibration de la charge en injectant aux bornes de la cellule d'étude une charge connue (± 5 pC) délivrée avec une fréquence de 3,7 kHz par un générateur de décharges appelé calibrateur. On effectue également une calibration de la phase. Cette opération permet de faire coïncider le passage par zéro de la tension appliquée à la cellule d'étude avec la position zéro du compteur de position dans le cycle.

Lors de l'acquisition, un point s'affiche sur l'écran de l'ordinateur à chaque fois qu'une décharge est détectée, à l'endroit de la sinusoïde qui correspond à l'apparition de cette décharge. La charge apparente de la décharge peut être relevée directement. Une acquisition se termine lorsque 4000 décharges ont été enregistrées ou si la durée d'acquisition initialement choisie a été atteinte. Il est également possible d'arrêter la mesure simplement en quittant le programme d'acquisition.

Il est possible d'effectuer plusieurs séries successives de 4000 décharges ou de programmer l'acquisition de plusieurs séries périodiquement dans le temps. Ces opérations sont effectuées sans interruption de la tension appliquée.

La tension appliquée peut contenir des surtensions dont la durée (par nombre de périodes), la périodicité et l'amplitude (en Volts) sont choisis.

Lors d'un claquage, l'appel de courant qui en résulte provoque la coupure de l'alimentation en tension de la cellule d'essai. L'acquisition est alors arrêtée.

Les résultats bruts d'une acquisition se présentent sous forme d'un tableau (tableau 3) qui donne pour chaque décharge, le numéro de la décharge (de 0 à 3999 maximum), le numéro du cycle où la décharge se produit ainsi que sa position dans ce cycle donnée par le numéro du canal correspondant (chaque cycle est divisé en 65536 canaux), la sortie du CAN, la charge apparente de la décharge avec son signe. Le tableau nous indique si une décharge a lieu lors d'une période de surtension ou si son intensité est supérieure à la gamme de mesure prédéfinie. Il nous renseigne également sur la présence de décharges intermédiaires non prises en compte car apparaissant entre deux décharges trop rapprochées.

N° décharge	N° cycle	N° position	CAD	Charge	Surtension	intermédiaire	Saturation
0	10676	6820	66	0,32573	0	0	0
1	10676	43966	-26	-0,13029	0	0	0
2	10683	6654	41	0,20358	0	0	0
3	10683	11449	33	0,16287	0	0	0
4	10683	41090	-214	-1,05863	0	1	0
5	10689	17727	82	0,40717	0	0	0
6	10696	7340	41	0,20358	0	0	0
7	10700	7325	63	0,30945	0	0	0
8	10700	9110	77	0,38274	0	0	0
9	10700	42164	-105	-0,52117	0	0	0
10	10709	11493	95	0,47231	0	1	0

Tableau 3. Extrait d'un fichier de résultats bruts d'une acquisition de décharges partielles

IV. 2. Logiciel de traitement des résultats:

Les résultats sont traités à l'aide d'un logiciel qui fonctionne sous Windows et qui permet de calculer pour chaque polarité, les grandeurs telles que la charge moyenne, l'énergie, la puissance, le débit quadratique des décharges, le courant moyen (voir définitions de ces grandeurs dans le paragraphe II. b. 2. d du chapitre I).

IV. 2. a. Les distributions du nombre et de l'amplitude des décharges :

Le schéma de la figure 7 illustre le découpage de la phase en fenêtres (ou canaux) de largeurs égales et le calcul d'une distribution. Pour chaque fenêtre de phase Φ_i on associe la grandeur n_i ou Q_i représentant respectivement le nombre et la charge moyenne des décharges apparaissant dans cette fenêtre de phase.

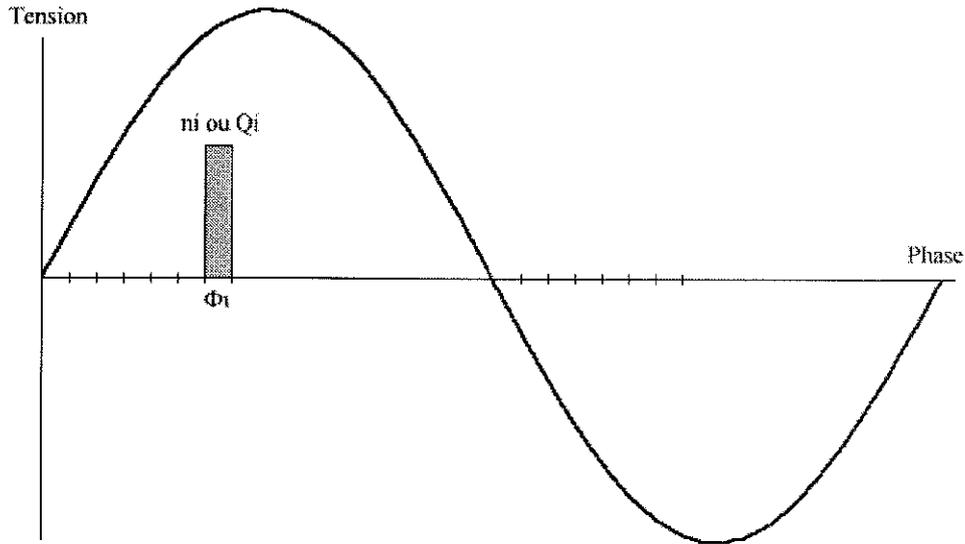


Figure 7. Schéma représentant le découpage de la phase en fenêtres de largeurs égales

Les distributions calculées et représentées par le logiciel sont:

$n(\Phi)$	nombre de décharges par position en fonction de la phase
$Q_{\text{moy}}(\Phi)$	charge moyenne par position en fonction de la phase
$n.Q_{\text{moy}}(\Phi)$	produit du nombre de décharge par la charge moyenne par position en fonction de la phase
$n(\Phi_1)$	nombre des 1 ^{ères} décharges dans un cycle par position en fonction de la phase
$Q_{\text{moy}}(\Phi_1)$	charge moyenne des 1 ^{ères} décharges dans un cycle par position en fonction de la phase
$n.Q_{\text{moy}}(\Phi_1)$	produit du nombre de décharge par la charge moyenne par position en fonction de la phase de la première décharge dans un cycle
$P_0(Q)$	probabilité d'avoir une décharge d'intensité Q
$P_0(Q_1)$	probabilité qu'une première décharge dans un cycle (ou période) ait une intensité Q_1
$P_0(\Phi_1)$	probabilité pour qu'une première décharge dans un cycle apparaisse à la phase Φ_1
$n(\Delta t)$	nombre de décharges en fonction de la durée entre 2 décharges successives
$Q(\Delta t)$	charge apparente en fonction de la durée entre deux décharges successives
$Q_{\text{moy}}(\Delta t)$	charge moyenne en fonction de la durée entre deux décharges successives

Tableau 4. Distributions statistiques

En plus des distributions décrites ci-dessus, le logiciel permet de visualiser l'évolution en fonction du temps de la charge apparente $q(t)$, de la charge cumulée par cycle $q_c(t)$ ainsi que de la tension d'apparition par décharge $V_{inc}(t)$.

IV. 2. b. Paramètres statistiques classiques:

Les paramètres statistiques calculés pour chaque distribution du type $X(\Phi)$ (X pouvant être le nombre ou la charge apparente des décharges) sont définis dans ce qui suit. La phase de l'onde de tension est divisée en N canaux de même largeur avec :

$$\Phi = \bigcup_{i=1}^N \Phi_i = 2\pi$$

1. Moyenne de la grandeur:

$$M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(\Phi_i) \quad (\text{II-1})$$

2. Largeur de la distribution:

$$\Delta\Phi$$

3. Angle de début de la distribution:

$$\Phi_0$$

5. Poids du i^{eme} canal :

$$P_i = \frac{X(\Phi_i)}{\sum_{i=1}^N X(\Phi_i)} \quad (\text{II-2})$$

6. Moyenne pondérée de la phase :

$$\bar{\Phi} = \sum_{i=1}^N \Phi_i P_i \quad (\text{II-3})$$

7. Ecart-type :

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N P_i (\Phi_i - \bar{\Phi})^2} \quad (\text{II-4})$$

8. Moment d'ordre 3 ou Skewness (symétrie) :

$$S_k = \frac{1}{\sigma^3} \sum_{i=1}^N (\Phi_i - \bar{\Phi})^3 P_i \quad (\text{II-5})$$

9. Moment d'ordre 4 ou Kurtosis (aplatissement):

$$K_u = \left[\frac{1}{\sigma^4} \sum_{i=1}^N (\Phi_i - \bar{\Phi})^4 P_i \right] - 3 \quad (\text{II-6})$$

IV. 2. c. Nouveaux paramètres statistiques introduits:

Les définitions de ces paramètres sont données ci-dessous.

IV. 2. c. 1. Coefficients de position (Pos) :

Ils sont déduits des phases moyennes pondérées des distributions $n(\Phi)$ et $Q_{moy}(\Phi)$ relatives à un intervalle de phase de 180° .

$$\text{Pos}_{n+} = \frac{\sum_{i=1}^N \Phi_i P_i}{180} \quad \text{et} \quad \text{Pos}_{n-} = \frac{(\sum_{i=1}^N \Phi_i P_i) - 180}{180} \quad (\text{II-7 et 8})$$

Ces coefficients sont compris entre -0,5 et 0,5.

IV. 2. c. 2. Coefficient d'efficacité énergétique des décharges (EEF) :

Ce paramètre est égal au rapport entre l'énergie apparente des décharges par l'énergie des décharges si celles-ci apparaissent toutes au maximum de la tension. Ce rapport peut varier de 0 à 1.

M est le nombre total de décharges mesurées lors d'une acquisition, V est la tension de l'essai, Q_j est la charge apparente de la $j^{\text{ème}}$ décharge, $V(t_j)$ est la tension instantanée à l'instant t_j où la $j^{\text{ème}}$ décharge a lieu.

$$\text{EEF} = \frac{E}{MQ_{\text{moy}}V_{\text{max}}} = \frac{\sum_{j=1}^M |Q_j V(t_j)|}{V_{\text{eff}} \sqrt{2} \sum_{j=1}^M |Q_j|} \quad (\text{II-9})$$

V. AUTRES DISPOSITIFS

V. 1. Dispositif de mesure des impulsions de courant:

Le système de détection électrique comprend également un montage de visualisation directe des impulsions de courant comportant une résistance de mesure, un amplificateur de courant de gain 50 et un oscilloscope numérique très rapide HP 54542 C, ayant une bande passante de 500 MHz, une fréquence d'échantillonnage de 2 Géch/s sur 4 voies et un lecteur de disquette permettant l'enregistrement des oscillogrammes.

V. 2. Dispositif de visualisation des décharges partielles:

L'ensemble de détection optique a une grande sensibilité et permet de détecter les décharges, de les localiser avec précision et de suivre leur évolution au cours du temps.

Il est constitué d'une caméra CCD de haute résolution de marque Hamamatsu en série avec un intensificateur d'image de même marque ayant un gain réglable. La caméra a une réponse spectrale couvrant le visible et le proche infrarouge. L'ouverture et l'obturation de la caméra sont commandées par un micro-ordinateur. L'intervalle de temps minimum est de 330 ns. Il est possible de synchroniser l'ouverture de la caméra avec l'horloge de l'oscillateur sinusoïdal qui alimente le transformateur. Le logiciel Global Lab Acquire permet la capture d'images lors de la visualisation continue.

L'intensificateur d'image a une réponse spectrale allant de l'ultraviolet au proche infrarouge.

La visualisation des images s'effectue directement sur un moniteur. Un magnétoscope SVHS permet d'enregistrer l'évolution de la lumière émise au cours du temps par les D.P.

V. 3. Dispositif de mesure du courant lumineux:

La cellule d'étude est plaquée contre une des parois de la cage de Faraday où une ouverture a été faite afin d'y insérer l'objectif du photomultiplicateur. Ces mesures sont réalisées à l'aide d'un photomultiplicateur type RCA . Le photocourant est mesuré à l'aide d'un électromètre, l'impulsion de courant lumineux est visualisée à l'aide d'un oscilloscope.

V. 4. Dispositif de vieillissement des modèles de condensateurs:

Ce dispositif permet de conjuguer les contraintes thermique et électrique appliquées à une cellule d'étude afin d'en simuler le vieillissement.

Il comprend une étuve permettant d'atteindre 300°C. Un générateur de tension alimente en parallèle 8 transformateurs élévateurs de sorte que l'on puisse alimenter en haute tension 8 cellules différentes placées à l'intérieur de l'étuve. Huit compteurs séparés permettent de mesurer la durée du vieillissement de chaque cellule. Des relais permettent l'interruption de l'alimentation et l'isolement d'une des huit branches du montage si un claquage survient dans la cellule correspondante. Le compteur associé est alors arrêté.

V. 5. Dispositif de mesure des décharges partielles à froid:

Il comprend une étuve thermostatée qui atteint des températures jusqu'à -40°C. Cette étuve comprend une fonction séchage qui permet d'éviter la formation de givre à basse température. La cellule d'étude est placée dans une boîte métallique servant de cage de Faraday placée à l'intérieur de l'étuve. Le câble blindé qui relie la sortie HT du transformateur à la cellule de mesure dans l'étuve a été spécialement conçu pour ne pas présenter de décharges supérieures à 0,05 pC aux tensions inférieures à 5 kV_{eff}. La tête de mesure est branchée, par l'intermédiaire d'une connexion usinée sur la boîte métallique, à la cellule d'étude.

VI. TESTS DE VALIDATION DU MESUREUR DE D. P.

V. 1. Symétrie de détection et de mesure entre décharges positives et décharges négatives:

Le signal créneau ($\pm 5\text{pC}$) issu du calibrateur est envoyé à l'entrée du dispositif de mesure des décharges. La symétrie du signal est vérifiée à l'aide d'un oscilloscope.

Plusieurs acquisitions de 4000 décharges sont effectuées en variant la sensibilité de mesure.

Pour chaque acquisition, la charge moyenne (Q_+ pour les décharges positives et Q_- pour les décharges négatives) et le nombre (n_+ pour les décharges positives et n_- pour les décharges négatives) de décharges positives et négatives sont mesurés.

Le signal injecté étant parfaitement symétrique, les rapports $\frac{n_+}{n_-}$ et $\frac{Q_+}{Q_-}$ devraient être égaux à 1. Dans le cas contraire, cela indiquerait une dissymétrie de détection (si $\frac{n_+}{n_-} \neq 1$) ou de mesure (si $\frac{Q_+}{Q_-} \neq 1$).

Dans la figure 8, nous représentons l'influence du rapport de gamme sur les grandeurs $\frac{n_+}{n_-}$ et $\frac{Q_+}{Q_-}$. Le rapport de gamme R_g étant égal à la valeur absolue du rapport de la charge délivrée par le calibrateur (constante et égale à : $\pm 5\text{ pC}$) sur la charge maximum mesurable par le dispositif et qui dépend de la sensibilité de mesure sélectionnée. Par exemple si R_g vaut 10 %, cela signifie que la charge maximum mesurable vaut 50 pC.

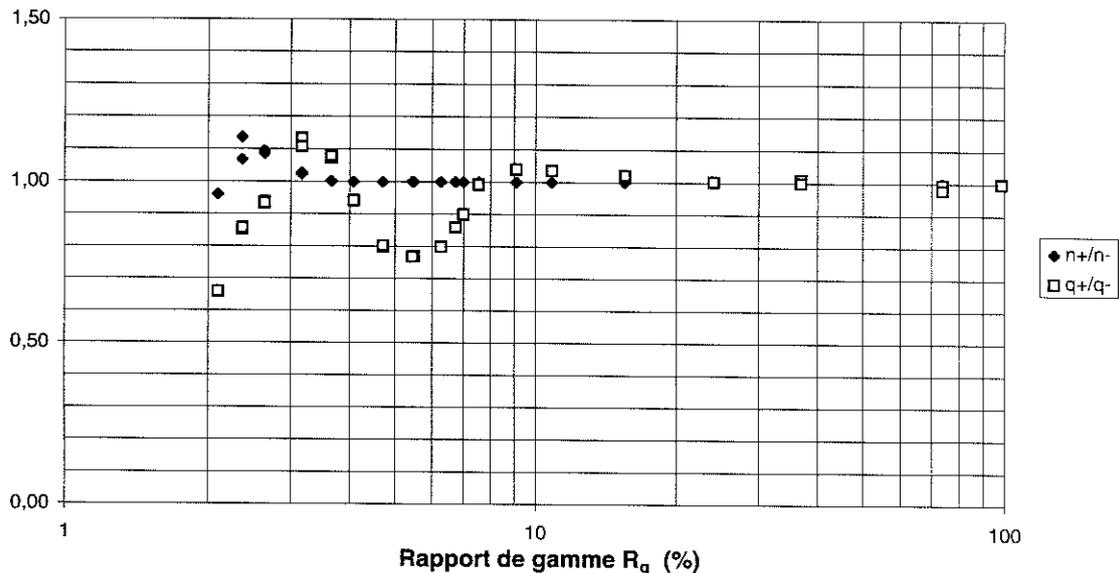


Figure 8. Evolution des rapports $\frac{n_+}{n_-}$ (◆) et $\frac{Q_+}{Q_-}$ (□) en fonction du rapport de gamme R_g (échelle logarithmique pour les abscisses)

Les abscisses sont les valeurs de R_g en %, les ordonnées sont les valeurs des rapports $\frac{n_+}{n_-}$ et $\frac{q_+}{q_-}$.

Le rapport des nombres $\frac{n_+}{n_-}$ reste stable et égal à 1 lorsque le rapport de gamme est supérieur à 3 %. Le rapport des charges moyennes $\frac{Q_+}{Q_-}$ est par contre assez fluctuant pour un rapport de gamme inférieur à 8 %. Par exemple, $\frac{Q_+}{Q_-}$ est inférieur à 0,8 pour un rapport de gamme de 5,5 %. Pour un rapport de gamme légèrement supérieur à 2 %, $\frac{Q_+}{Q_-}$ vaut 0,65.

On en déduit que l'appareil de mesure a une très bonne symétrie de détection sur quasiment l'ensemble de la gamme de sensibilité. Mais pour avoir une bonne symétrie de mesure entre les décharges positives et négatives, il est impératif de travailler avec un rapport de gamme supérieur à 7 %.

VI. 2. Mesure de décharges très rapprochées:

On génère à l'aide d'une cellule pointe-plan dans l'air des décharges de type couronne. Les décharges ainsi générées sont connues pour avoir des amplitudes qui ne dépendent que du rayon de courbure de la pointe et leur fréquence est proportionnelle au carré de la tension appliquée [Lam74].

Lorsqu'une tension alternative est appliquée à cette cellule, les décharges n'apparaissent qu'en polarité négative de la tension. Elles sont situées autour du sommet de la tension et leur fréquence croît au fur et à mesure que l'on s'approche de ce sommet.

La figure ci dessous représente la distribution $n(\Phi)$ enregistrée avec une cellule pointe plan (rayon de la pointe: 3 μm , distance entre la pointe et le plan: 5 mm) dans l'air pour deux tensions différentes. La tension d'apparition des décharges (TADP) vaut 1700 V_{eff} .

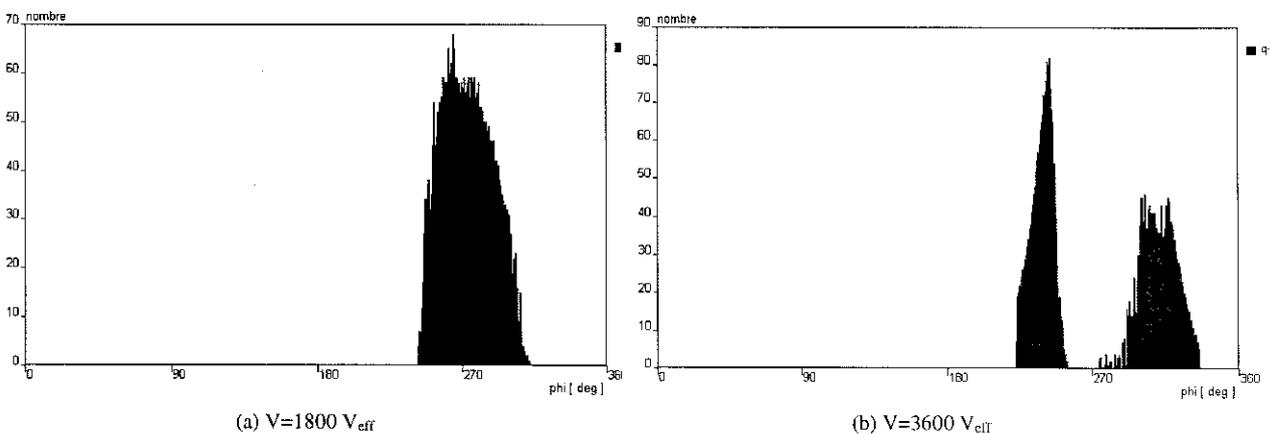


Figure 9. Distribution $n(\Phi)$ pour des décharges pointe-plan dans l'air, (a) $V=1800 V_{\text{eff}}$, (b) $V=3600 V_{\text{eff}}$.

CHAPITRE III

DECHARGES PARTIELLES DANS UN MODELE DE CONDENSATEUR SANS DEFAUT

CHAPITRE III

Décharges partielles dans un modèle de condensateur sans défaut

INTRODUCTION

Nous appelons « modèle de condensateur sans défaut » un condensateur plan de faible capacité (de 50 à 100 pF) dépourvu de toute anomalie qui pourrait provoquer un renforcement du champ électrique ou une baisse de la rigidité diélectrique du milieu. Cette anomalie aurait alors pour conséquence une tension d'apparition des décharges partielles plus faible. Les décharges induites par des défauts de l'isolation seront abordées ultérieurement.

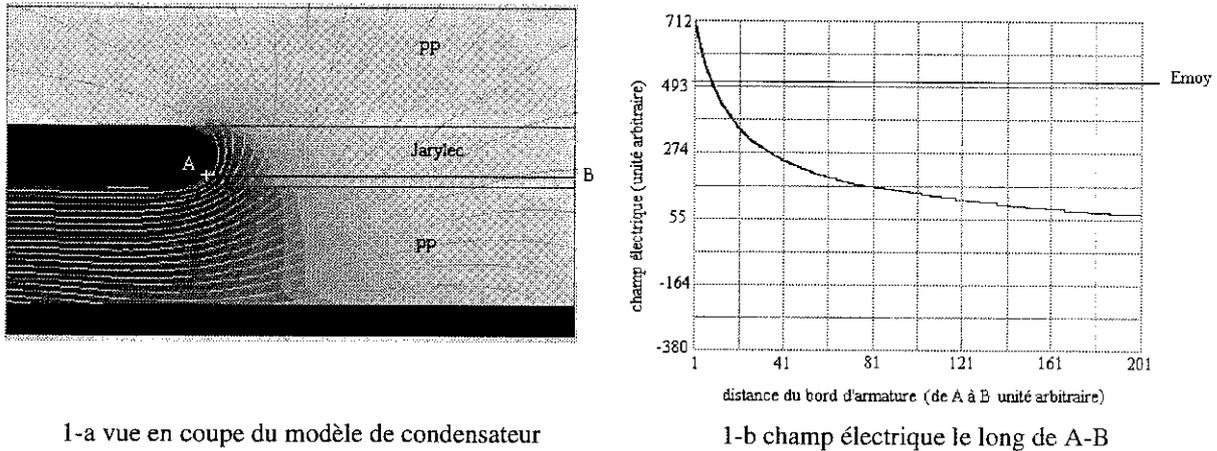
Ce chapitre est consacré à l'étude des décharges partielles apparaissant dans deux modèles différents de condensateur sans défaut qui sont respectivement le modèle symétrique avec des armatures de même épaisseur (6 μ m) dont les extrémités sont repliées et un modèle dissymétrique dont les armatures ont des épaisseurs respectives de 6 μ m et 112 μ m.

Nous avons déterminé la tension d'apparition des décharges, l'évolution en fonction de la tension appliquée de certaines grandeurs telles que la fréquence ou l'amplitude des décharges, l'allure des distributions des décharges. Un paragraphe est consacré aux paramètres statistiques caractérisant les décharges. Nous examinons également l'effet de l'épaisseur du diélectrique sur les phénomènes observés. Dans le cas du modèle symétrique, nous étudions l'effet de l'abaissement de la température et du vieillissement sur les décharges partielles. Un paragraphe est consacré à l'acquisition de la lumière émise en bord d'armature et la comparaison avec la mesure des décharges partielles.

DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE DANS NOTRE MODELE DE CONDENSATEUR

Avant d'aborder dans le détail les résultats, nous examinons les sites probables des décharges partielles dans notre modèle de condensateur que nous décrivons en détail dans le paragraphe II. 1, chapitre II, en l'absence de défauts, ce qui nous amène à étudier la distribution spatiale du champ électrique dans ce modèle lorsqu'une haute tension est appliquée à ses bornes.

Les figures 1-a et 1-b ont été obtenues par simulation à l'aide du logiciel SCSP [CSP]. La figure 1-a est une représentation en coupe (2D) de la répartition de l'intensité du champ électrique dans la géométrie de notre étude. Les zones de champ intense sont représentées en couleur sombre. Les zones de champ plus faible sont représentées par des couleurs plus claires. La courbe 1-b représente la répartition du champ électrique sur la ligne A-B où A est le point où l'intensité du champ est maximale (obtenu à l'aide du logiciel SCSP). Les unités de distance et de champ sont arbitraires mais le rapport entre épaisseur de métal et épaisseur de diélectrique est celui présenté par notre cellule d'étude.



1-a vue en coupe du modèle de condensateur
les armatures sont en noir.

1-b champ électrique le long de A-B

Figure 1. Répartition du champ électrique dans le modèle de condensateur. Au dessus de l'armature supérieure et en dessous de l'armature inférieure il y a une couche d'isolant dont l'épaisseur est grande devant la distance inter-électrodes.

Le champ électrique se concentre dans la zone d'influence totale, c'est à dire la zone où les deux armatures métalliques se superposent, soit un carré de environ $10 \times 10 \text{ mm}^2$ (figure 2-b, paragraphe II. 1, chapitre II).

Comme on pouvait s'y attendre, le champ le plus intense se trouve en bord d'armature. Sur les bords d'armatures, le champ électrique vaut 712 en unités arbitraires et le champ uniforme entre les deux électrodes est égal à 500 (figure 1-b). Le champ électrique est donc renforcé par un facteur 1,4 sur le bord d'armature, au point A.

RESULTATS

Les résultats présentés ci dessous ont été obtenus avec la cellule « modèle de condensateur tout film » décrite dans le chapitre (II).

La tension est augmentée progressivement par paliers. Les acquisitions sont effectuées durant chaque palier alors que la tension est maintenue constante. Une acquisition dure 5 mn,

si le nombre maximum de 4000 décharges n'est pas atteint. Sinon, à la fin de l'acquisition, la tension est maintenue constante jusqu'à épuisement de la durée (5 mn).

I. CELLULE SYMETRIQUE

I. 1. Description :

Dans les condensateurs industriels (galettes), deux feuilles d'aluminium aux bords repliés de même épaisseur sont séparées par deux films de polypropylène imprégnés. A chaque extrémité de la galette, deux armatures voisines sont décalées d'une distance de 15 mm appelée la marge. Ainsi, une feuille d'aluminium joue le rôle de pointe à l'une de ses extrémités et de plan à l'autre, comme l'indique la figure 2 de l'annexe 1.

Nous avons donc étudié la configuration suivante qui se rapproche du cas réel :

- Deux armatures en aluminium de 6 μm d'épaisseur à bords repliés
- Diélectrique constitué de 2 films de polypropylène rugueux de 13,6 μm d'épaisseur pondérale (ou 15 μm d'épaisseur mesurée) imprégnés au Jarylec C100 (imprégnation sous vide avec du liquide dégazé).

I. 2. Mesure des décharges partielles :

I. 2. a. Tension d'apparition des décharges partielles:

La tension d'apparition des décharges partielles déduite à partir du critère fréquentiel de plus d'une décharge par seconde vaut:

$$TADP = 5,6 \pm 0,2 \text{ kV}_{\text{eff}}$$

Le champ seuil d'apparition des décharges partielles est évalué à partir de l'expression suivante :

$$E_s = \frac{V_s}{d} \sqrt{\frac{d}{a}} \sqrt{\frac{\epsilon_{pp}}{\epsilon_l}} \quad (\text{III-1})$$

Précisons que cette formule a été établie pour une géométrie possédant une symétrie axiale, comme décrit dans la figure 10 du chapitre I. Nous avons toutefois pu vérifier sa

validité pour notre propre géométrie en calculant à l'aide du logiciel SCSP le facteur de renforcement de champ pour plusieurs épaisseurs de métal et de diélectrique.

V_s est la tension seuil ou TADP (en Volt crête), $a=12 \pm 1 \mu\text{m}$ est l'épaisseur du métal, d est l'épaisseur du diélectrique, ϵ_{pp} et ϵ_l sont respectivement les permittivités relatives du polypropylène et du Jarylec, soit 2,2 et 2,66.

L'épaisseur du diélectrique comprend l'épaisseur de polypropylène imprégné et l'épaisseur de la couche de liquide en série avec le PP (voir Annexe 3), soit $d=30+2,4=32,4 \mu\text{m}$ à 10 % près. Le champ seuil sur les bords d'armatures vaut donc :

$$E_s = 3,7 \pm 0,5 \text{ MV/cm}$$

En géométrie pointe plan, le champ seuil à l'extrémité de la pointe correspondant à la détection d'impulsions de courant est, dans les liquides aromatiques, de l'ordre de 4 à 5 MV/cm [Bro94]. Cette valeur est légèrement supérieure à ce que nous obtenons dans la géométrie « bord d'armature ». Ceci montre que, plus que la valeur du champ sur l'extrémité de la pointe ou du bord d'armature, c'est la chute de tension ou le champ moyen sur une longueur d'ionisation qui compte [Fox68]. Or ce champ moyen dépend de l'évolution du champ électrique en fonction de la distance de la pointe ou du bord d'armature.

I. 2. b. Evolution des DP en fonction de la tension appliquée:

1. Description générale des phénomènes observés :

On observe deux régimes différents de décharges partielles suivant la tension appliquée:

1^{er} régime :

Lorsque la tension appliquée est proche d'une valeur seuil dépendant de l'épaisseur du diélectrique (5,6 kV_{eff}), les décharges apparaissent de manière désordonnée dans la phase de la tension et avec un taux de répétition très faible. Ces décharges ne sont pas prises en compte car elles disparaissent rapidement si la tension est maintenue constante. Puis lorsqu'on dépasse ce seuil de tension, les décharges deviennent plus régulières et apparaissent de manière corrélée avec la phase de la tension appliquée. Les décharges négatives sont situées entre 180° et 270° de la phase de la tension alors que les décharges positives sont localisées entre 0° et 90°. Le nombre de décharges positives est égal au nombre de décharges négatives avec parfois des écarts allant de 1/3 à 3 .

On observe avec une caméra intensifiée des points lumineux de faible intensité en certains endroits le long des armatures.

Ces décharges sont stables dans le temps et ne conduisent pas au claquage même après des temps très longs. Si la tension est abaissée, la disparition de ces décharges a lieu à la

même tension que leur apparition. Ces décharges constituent ce que nous appelons le premier régime de décharges.

2^{ème} régime :

Si la tension appliquée est encore augmentée, on observe à partir d'un second seuil (7,6 kV_{eff}), l'illumination totale des bords d'armature. On enregistre des décharges d'un second type, caractérisées par des fortes intensités et une symétrie en nombre et en amplitude entre décharges positives et décharges négatives. Elles apparaissent de manière nettement plus décalée vers la gauche dans la phase de la tension que les décharges du régime 1 (voir Annexe 5 pour l'allure des distributions dans la phase). Si la tension appliquée est remise à zéro, ces décharges disparaissent à une tension beaucoup plus faible que leur seuil d'apparition (environ 500 à 1500 V_{eff}).

Ces décharges du second régime sont très nuisibles. Elles provoquent le claquage de la cellule au maximum quelques minutes après leur apparition.

2. Evolution de la fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée :

La figure 2 montre l'évolution de la fréquence moyenne des décharges en fonction de la tension appliquée. Chaque point de mesure est la moyenne de 5 mesures effectuées avec 5 cellules différentes. La fréquence moyenne de ces décharges est le rapport entre le nombre de décharges mesurées sur la durée d'acquisition.

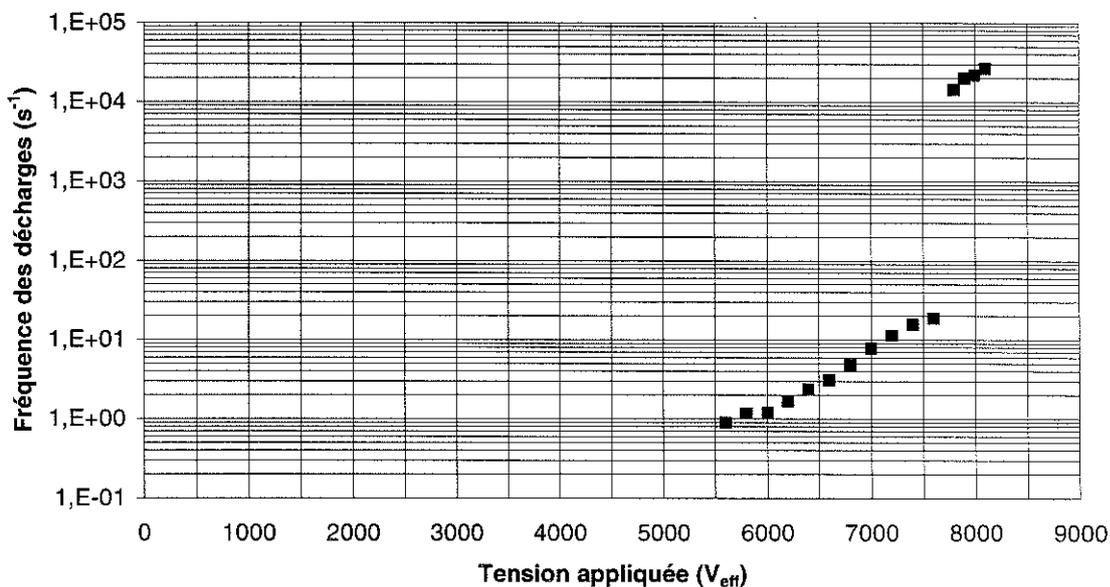


Figure 2. Evolution de la fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée (échelle semi-log)

Le premier régime s'étend de $V=5,6$ kV_{eff} à $V=7,6$ kV_{eff}. Le logarithme de la fréquence y augmente linéairement avec la tension appliquée. L'équation ci dessous obtenue à partir de la figure 2, décrit cette évolution :

$$f = 7.10^{-5} e^{0,0016.V} \approx e^{0,0016(V-TADP)}$$

Une transition s'opère à $V=7,6 \text{ kV}_{\text{eff}}$, la fréquence y est multipliée par environ 700. Au delà, les fréquences sont de quelques dizaines de kHz. Le claquage survient entre 8 et $8,2 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

3. Evolution de la charge apparente des décharges en fonction de la tension appliquée:

La figure 3 représente la variation de la valeur absolue de la charge apparente moyenne des décharges partielles positives et négatives en fonction de la tension appliquée.

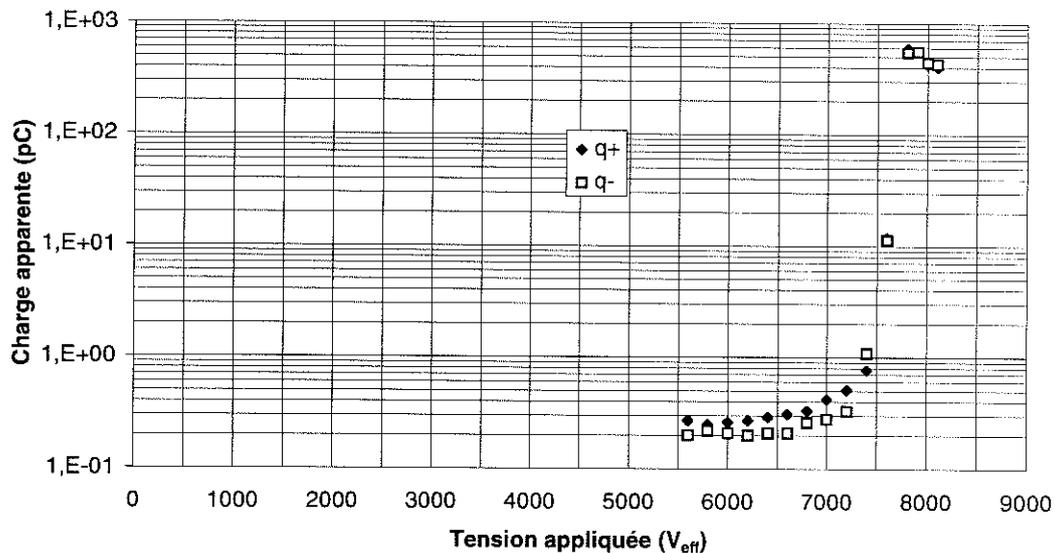


Figure 3. Charge apparente des décharges (♦ positives, □ négatives) en fonction de la tension (semi-log)

Les charges apparentes des décharges partielles du 1^{er} régime n'augmentent que faiblement avec la tension appliquée. Les décharges positives et négatives ont des allures régulières.

Lors de la transition du 1^{er} au 2^{eme} régime de décharges, il y a une très forte augmentation de la charge apparente. Les décharges du 2^{eme} régime ont des amplitudes de quelques centaines de pC en moyenne avec quelques décharges dépassant 1000 pC.

4. Synthèse :

Dans un condensateur constitué de $2 \times 13,6 \mu\text{m}$ de PP et d'armatures repliées de $6 \mu\text{m}$, les tensions seuils des régimes I et II des décharges sont respectivement 5600 et 7600 V_{eff} . Ces observations de deux régimes différents de décharges sont similaires à celles faites par Fox et al [Fox68]. Nous attribuons le 1^{er} régime à des avalanches électroniques dans le liquide suivies de la formation de bulles de gaz. Lorsque le liquide près des armatures est saturé en gaz, il apparaît un second régime de décharges se produisant dans les poches de gaz.

I. 3. Emission de lumière en bord d'armatures :

La lumière émise par les DP a été localisée à l'aide d'une caméra intensifiée. Des exemples ont été donnés précédemment. Nous avons aussi mesuré l'intensité lumineuse émise par les décharges à l'aide d'un photomultiplicateur. Le dispositif expérimental est décrit dans le paragraphe IV. 3 du chapitre II.

Ces essais ont été effectués afin de vérifier les résultats obtenus par la détection électrique des DP, et en particulier : le seuil d'apparition des DP, l'existence de deux régimes de décharges. Enfin, ces essais nous permettront de mettre en évidence l'effet de la polarité du bord d'armature.

I. 3. a. Résultats:

1. Mesure de la composante continue du photocourant:

Le photocourant délivré par le PM est mesuré à l'aide d'un électromètre. La tension est augmentée progressivement de $V=0$ à $V=1000V_{\text{eff}}$, l'indication de l'électromètre reste stable et égale au bruit de fond initial, rien n'est détecté à l'oscilloscope. Puis à partir de $1000 V_{\text{eff}}$, le photocourant mesuré par l'électromètre devient supérieur au bruit de fond et commence à croître avec la tension appliquée comme le montre la figure 4.

Le courant lumineux lorsqu'il est stable (pas d'impulsions), varie en exponentielle de V . L'expression $I(V)$ du courant lumineux déduite de la figure 4 est:

$$I - I_{BF} = k.e^{0,0015(V-V_s)}$$

I_{BF} est le courant dû au bruit de fond du PM, $V_s=1000 V_{\text{eff}}$ est la tension au dessus de laquelle le phénomène lumineux est supérieur au bruit de fond, K est une constante.

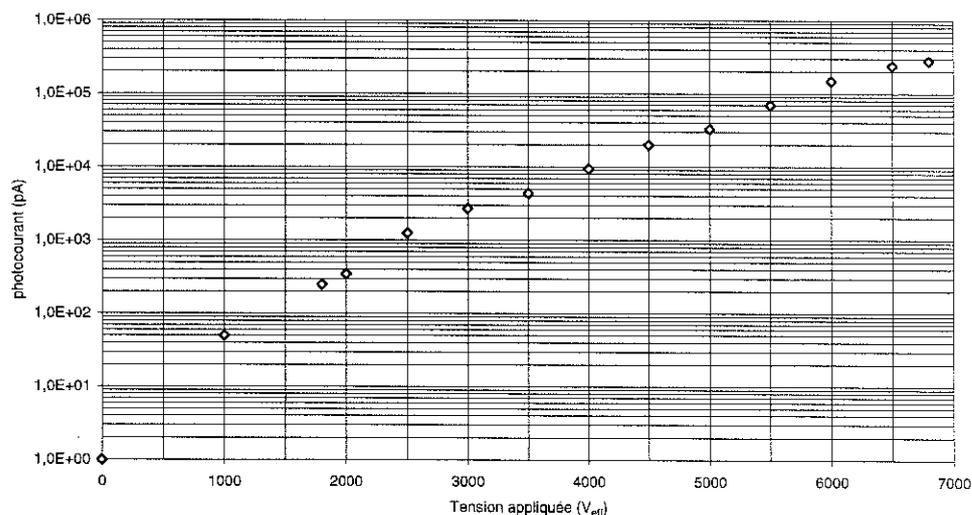


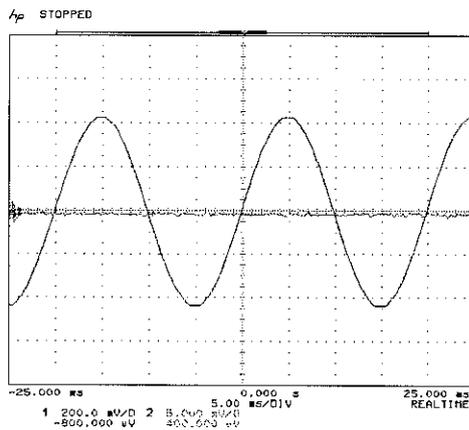
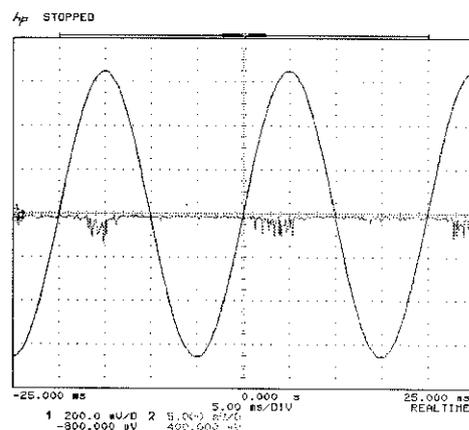
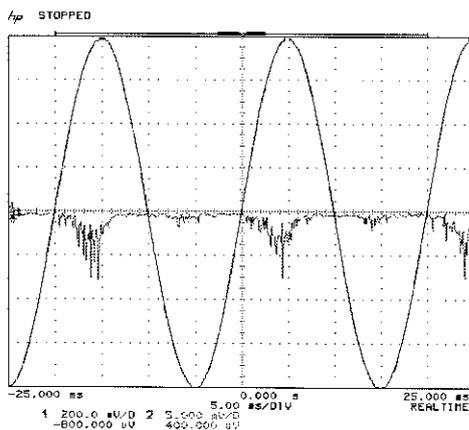
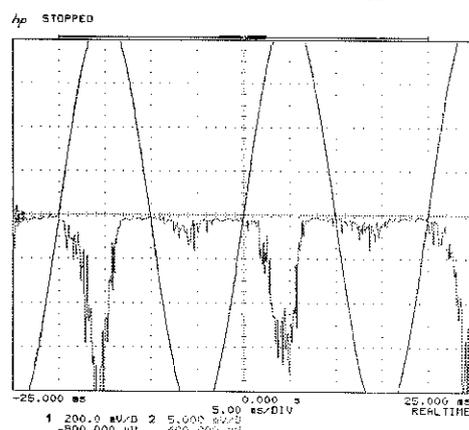
Figure 4. Evolution du courant lumineux intégré en fonction de la tension («échelle semi-log»)

2. Observation des variations instantanées du photocourant:

Jusqu'à $5500 V_{\text{eff}}$, on n'observe quasiment rien à l'oscilloscope, même si entre environ $4000 V_{\text{eff}}$ et $5500 V_{\text{eff}}$ quelques rares impulsions de courant apparaissent sur la demi alternance négative de la tension de manière irrégulière (figure 5-b).

A partir de $5500 V_{\text{eff}}$, on détecte un courant aussi bien en demi alternance positive qu'en demi alternance négative (dans les figures 5, a à f, la sinusoïde est l'opposée de la tension appliquée à la cellule). Mais le courant positif reste moins important en intensité et en nombre de pics que le courant négatif. Par exemple, pour $V=6,5 kV_{\text{eff}}$ (figure 5-f), l'intensité maximale du courant est 8 fois plus importante en demi alternance négative qu'en demi alternance positive. On constate aussi que le courant lumineux est formé par un fond continu qui augmente avec la tension, sur lequel viennent se superposer des pics. Le courant est décalé par rapport aux sommets de la tension appliquée.

Les constatations précédentes restent vraies jusqu'à une tension de $7,5 kV_{\text{eff}}$ à partir de laquelle les courants positif et négatif deviennent similaires en forme et en intensité. On remarque qu'à partir de ce seuil de tension, l'allure du courant change: les pics deviennent largement plus importants que le fond continu et le décalage vers la gauche est plus important.

5-a. $V=3000 V_{\text{eff}}$ 5-b. $V=4500 V_{\text{eff}}$ 5-c. $V=5500 V_{\text{eff}}$ 5-d. $V=6500 V_{\text{eff}}$

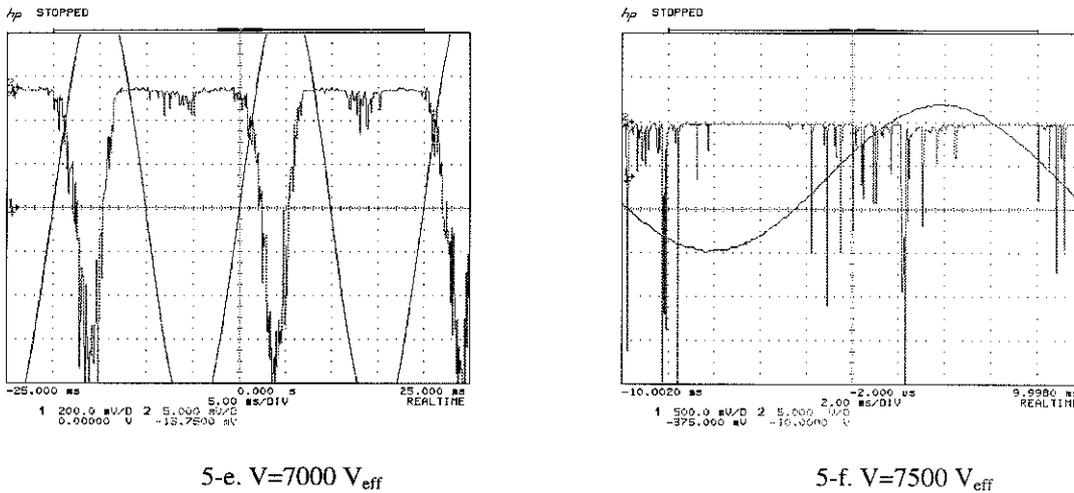


Figure 5. Allure du photocourant pour différentes tensions. La sinusoïde est l'opposée de la tension appliquée.

Ces observations sont à rapprocher de celles faites sur les distributions $n(\Phi)$ et $Q_{moy}(\Phi)$ des décharges partielles présentées dans le paragraphe II de l'annexe 5.

Si on compare par exemple l'allure de la distribution $n(\Phi)$ de la figure 4, de l'annexe 5 à la forme du photocourant de la figure 5-f, tout en rappelant que les résultats des deux courbes correspondent au même régime de décharge, on remarque que l'étalement angulaire du courant lumineux d'une part et de la distribution $n(\Phi)$ de l'autre occupe quasiment la même proportion de la période. Notons également le net décalage par rapport aux sommets de la sinusoïde de sorte qu'à chaque fois les décharges s'arrêtent pratiquement lorsque la tension est maximale et démarrent bien avant le passage par zéro.

3. Evolution du maximum du photocourant avec la tension appliquée:

La figure 6 présente l'évolution en fonction de la tension appliquée du maximum du courant lumineux.

Le maximum est déterminé parmi un grand nombre d'impulsions détectées, en fonction de la tension appliquée.

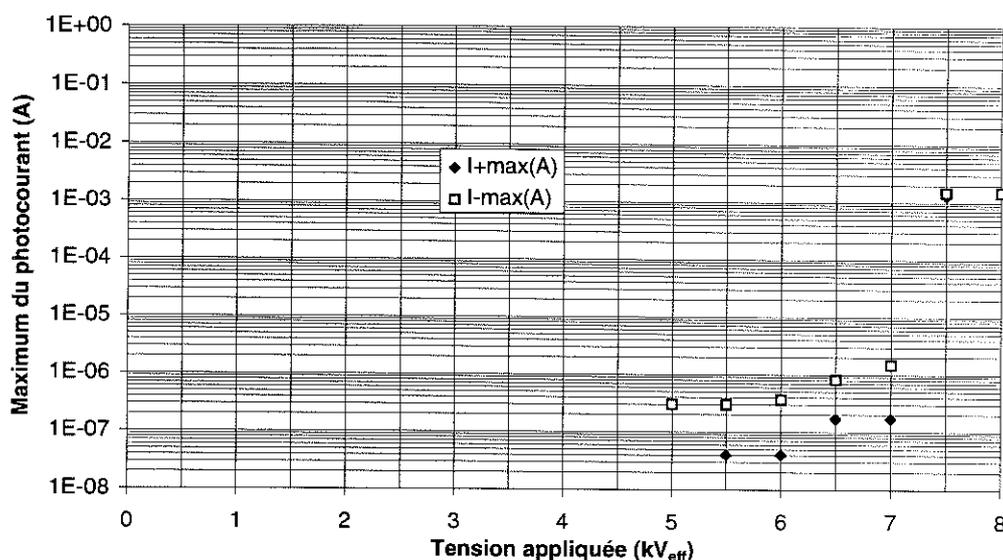


Figure 6. Maximum du photocourant (◆ positif, □ négatif) en fonction de la tension appliquée (semi-log)

On observe l'augmentation progressive avec la tension des maxima des courants lumineux négatifs et positifs dans les domaines 5-7 kV_{eff} et 5,5-7 kV_{eff} respectivement. Le rapport entre mesures négatives et positives lorsque les deux domaines coïncident est d'environ 10. Puis on observe un saut de 3 décades en négatif et de 4 décades en positif de sorte qu'au delà de 7,5 kV_{eff} les deux courants deviennent égaux.

I. 3. b. Conclusion:

Les mesures décrites dans ce paragraphe permettent de mettre en évidence qu'à 1000 V_{eff}, c'est à dire bien avant la détection des décharges partielles, le courant lumineux mesuré à l'aide d'un électromètre devient supérieur au bruit de fond. Ce courant croît de manière exponentielle avec la tension appliquée : $I = k \cdot e^{\alpha V}$. Des observations similaires ont été faites dans une étude précédente [Gos96], avec notamment un seuil à 1500 V_{eff} et une croissance exponentielle du courant avec un coefficient $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-3}$ proche de notre valeur : $1,5 \cdot 10^{-3}$.

Un seuil apparaît à 5500 V_{eff} à partir duquel on observe un courant à l'oscilloscope de manière régulière sur les deux demi-alternances de la tension appliquée avec une prépondérance du courant apparaissant en polarité négative. Ces courants sont la superposition d'un fond continu et de pics. Le fond continu croît plus rapidement que les impulsions avec la tension appliquée jusqu'à un second seuil où le courant apparaît de manière identique sur les deux demi-alternances. A partir de ce seuil (7500 V_{eff}), les courants sont nettement plus intenses que ceux obtenus au dessous de ce seuil (rapport 1000). Le fond continu devient négligeable par rapport aux impulsions.

Le fond continu particulièrement important dans les liquides aromatiques, est attribué à des réactions chimiques mettant en jeu les noyaux aromatiques à l'interface métal-liquide et provoquées par le courant de conduction [Gos96]. A ce courant, s'ajoutent des impulsions

lumineuses qui correspondent à des décharges partielles. Ces impulsions présentent un effet de polarité comme les décharges, et augmentent très fortement en intensité lorsque la tension dépasse le seuil de $7500 V_{\text{eff}}$ qui est le seuil de transition du 1^{er} au 2^{eme} régime de décharges.

Il apparaît à la suite de cette étude qu'il existe un effet de polarité que la mesure des décharges partielles avec une cellule symétrique ne met pas en évidence. Les phénomènes sont initiés avec la polarité négative du bord d'armature. Mais à chaque demi-période, on cumule les décharges négatives issues d'un des deux bords d'armature avec les quelques décharges positives issues de la contre-électrode. Si le bord d'armature est relié à l'électrode de haute tension alors ces décharges apparaissent en polarité négative. Si au contraire le bord est connecté à la masse alors ces décharges seront détectées comme des décharges positives.

Il est donc nécessaire de vérifier cet effet de polarité par la mesure des décharges partielles sur une cellule dissymétrique. C'est ce que nous présenterons dans le paragraphe II.

I. 4. DISTRIBUTIONS DES DECHARGES ET PARAMETRES STATISTIQUES

I. 4. a. Distributions des décharges:

Nous avons enregistré les distributions $n(\Phi)$, $Q_{\text{moy}}(\Phi)$ et $P_0(Q)$ pour les deux régimes de décharges. Compte tenu de la symétrie présentée par la géométrie du modèle, dans chacune des demi-périodes, on enregistre les décharges négatives sur l'une des électrodes et des décharges positives se produisant sur l'autre. Ces distributions sur la $\frac{1}{2}$ période positive et la $\frac{1}{2}$ période négative de la tension doivent donc être semblables quelque soit la tension, ce qui est effectivement observé. Ces distributions qui englobent les phénomènes sur les deux électrodes sont données dans l'annexe 5, paragraphe II.

D'après les observations de la lumière émise, pendant le 1^{er} régime, l'enregistrement est essentiellement composé de décharges se produisant sur la cathode. Pendant le 2^{eme} régime, il est composé de décharges se produisant sur les 2 électrodes en quantités comparables.

Les distributions obtenues dans une cellule dissymétrique séparant bien les phénomènes sur les deux électrodes, seront données dans le paragraphe II.

I. 4. b. Paramètres statistiques:

Le tableau 1 rassemble les valeurs des paramètres statistiques Skewness (S_k) et Kurtosis (K_u) obtenus avec les distributions $n(\Phi)$ et $Q_{\text{moy}}(\Phi)$ ainsi que les coefficients de position et le coefficient EEF. Les valeurs fournies pour chaque paramètre sont les valeurs minimales et maximales obtenues.

Les valeurs des coefficients ne sont donnés que lorsque la population de décharges est supérieure à 100.

	1 ^{er} régime	2 ^{ème} régime
Pos _n	0,33 à 0,38	0,14 à 0,20
Pos _q	0,31 à 0,37	0,15 à 0,20
Sk _n	-1,2 à 0,6	-0,2 à 0,1
Ku _n	0,5 à 3	-0,9 à -0,2
EEF	0,75 à 0,9	0,4 à 0,65

Tableau 1. Paramètres statistiques pour la cellule à armatures repliées

Les moments d'ordre supérieur de la distribution $Q_{moy}(\Phi)$ ne sont pas donnés dans le tableau 1 car aucune tendance n'a pu être dégagée.

En dehors du Sk_n, on note le changement très net des valeurs des coefficients au passage du 1^{er} au 2^{ème} régime de décharges. Par exemple, le Kurtosis de $n(\Phi)$ passe d'une valeur comprise entre 0 et 5 lors du 1^{er} régime (distribution de forme pointue) à des valeurs comprises entre -0,9 et -0,2, traduisant une allure arrondie. Les coefficients de position diminuent indiquant le déplacement vers la gauche des distributions dans la phase.

I. 5. EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE PP

Des essais ont été effectués avec 3 épaisseurs de PP différentes: 1 ou 2 films de 15 μm d'épaisseur et 1 film lisse de 100 μm .

Les phénomènes observés sont identiques quelque soit l'épaisseur de diélectrique. Seules les tensions caractéristiques changent. Le tableau 2 donne les valeurs de ces tensions.

Épaisseur de PP (μm)	TADP (V_{eff})	Tension de transition (V_{eff})	Tension de claquage (V_{eff})
15	3700	5300	5400
30	5600	7500	8100
100	9800	>12,5 kV _{eff}	>18,5 kV _{eff}

Tableau 2. Tensions caractéristiques obtenues avec 3 épaisseurs de PP différentes. Pour le film de 100 μm , la tension maximale délivrée par notre source (12,5 kV_{eff}) a été atteinte sans observer de transition.

La tension d'apparition est proportionnelle à la racine carrée de l'épaisseur de diélectrique. Les champs seuils d'apparition des décharges et de transition valent respectivement: 3,6 et 5,1 MV/cm, indépendamment de l'épaisseur de PP. Ce qui conforte l'hypothèse que ces valeurs soient des caractéristiques du liquide lui même.

I. 6. EFFET D'UNE SUREPAISSEUR DE LIQUIDE

On s'attend à ce que l'augmentation du volume de liquide près des bords d'armatures facilite le mouvement des bulles créées par les décharges partielles et modifie les régimes de décharges.

Aussi, nous avons placé une lamelle de PP de 13,6 μm d'épaisseur et de même largeur que les armatures au dessus de l'armature supérieure. Une seconde lamelle de même dimension est placée au dessous de l'armature inférieure. Ainsi, près des bords d'armature, l'épaisseur de liquide est sensiblement augmentée (environ le double), par rapport au cas d'une cellule sans surépaisseur (figure 7).

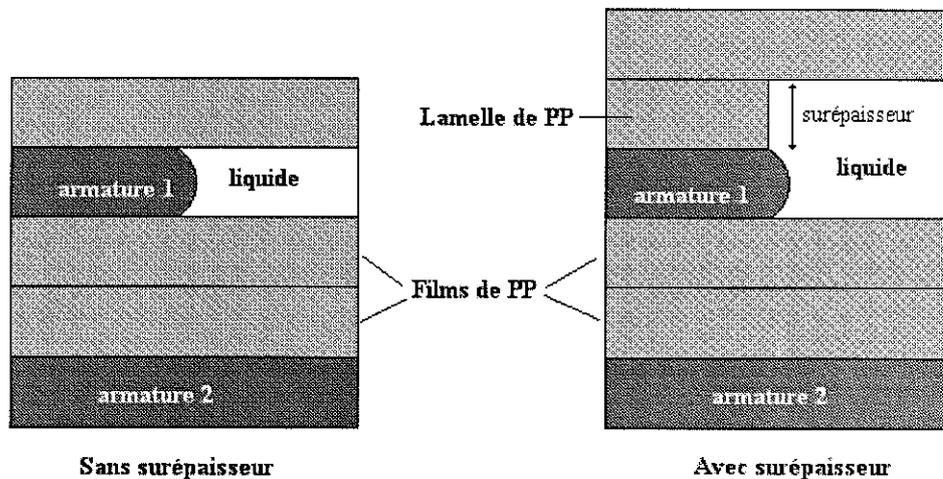


Figure 7. Schéma en coupe de la cellule avec ou sans surépaisseur de liquide (nous ne représentons que la surépaisseur au niveau de l'armature 1).

I. 6. a. Evolution des DP en fonction de la tension appliquée:

Comme dans une cellule sans surépaisseur de liquide, on note la présence de deux régimes de décharges partielles.

Le tableau 3 présente les tensions caractéristiques de ces décharges. La TADP est supérieure à celle obtenue avec une cellule sans surépaisseur alors que la tension de transition entre les deux régimes de décharges est quasiment inchangée.

	TADP (V_{eff})	Tension de transition (V_{eff})
Moyenne	6900	7250
Ecart avec cellule sans surépaisseur (%)	+ 23	négligeable

Tableau 3. Tensions caractéristiques (moyenne de 4 expériences)

Lorsque, après passage au second régime de décharges, la tension est progressivement diminuée, les décharges disparaissent à environ $3 \text{ kV}_{\text{eff}}$, ce qui est largement supérieur à la TEDP mesurée dans les mêmes conditions avec une cellule sans surépaisseur (dont la TEDP est d'environ 500 à $1500 \text{ V}_{\text{eff}}$). Puis si la tension est augmentée de nouveau, les décharges réapparaissent vers 3 à $4,5 \text{ kV}_{\text{eff}}$, mais ont tendance à disparaître lorsque la tension appliquée est maintenue à ce niveau pendant quelques minutes. Le phénomène de décharge ne se réamorce que lorsqu'on avoisine la TADP initiale.

1. Evolution de la fréquence des DP en fonction de la tension appliquée:

La figure 8 représente l'évolution de la fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée avec ou sans surépaisseur de liquide. Le rapport entre les deux fréquences est, dans le 1^{er} régime d'environ 10 en faveur des décharges dans une cellule sans surépaisseur puis au delà de la transition, les courbes ont tendance à se rejoindre.

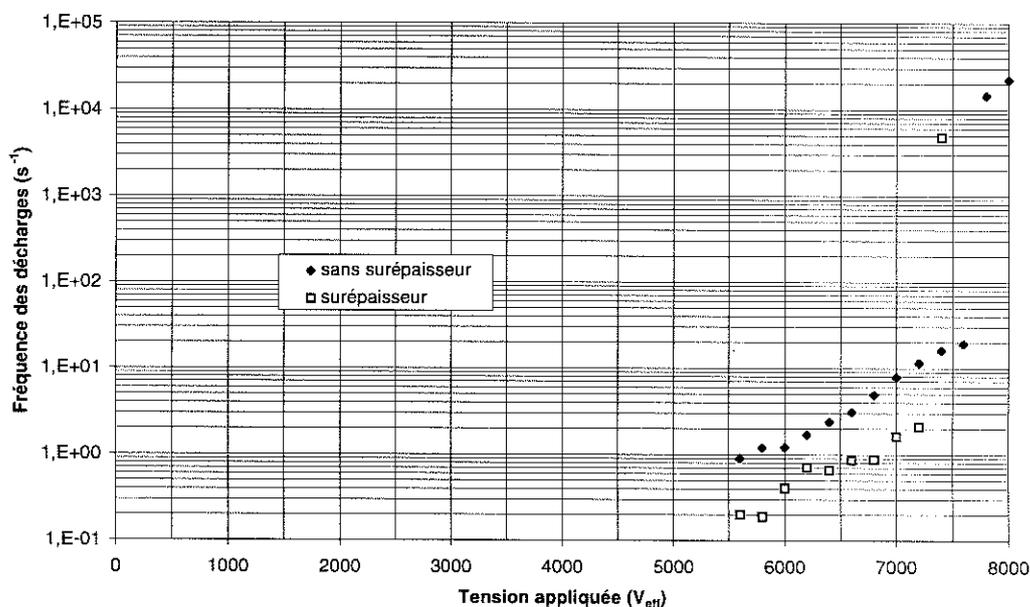


Figure 8. Fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée. Comparaison entre le cas d'une cellule sans surépaisseur (◆) et avec surépaisseur (□) (échelle semi-log)

2. Evolution de l'amplitude des DP en fonction de la tension appliquée:

L'amplitude des décharges est plus élevée dans le cas d'une surépaisseur de liquide avec un rapport moyen de 10 (figure 9). Les valeurs tendent à se rejoindre après la transition au second régime.

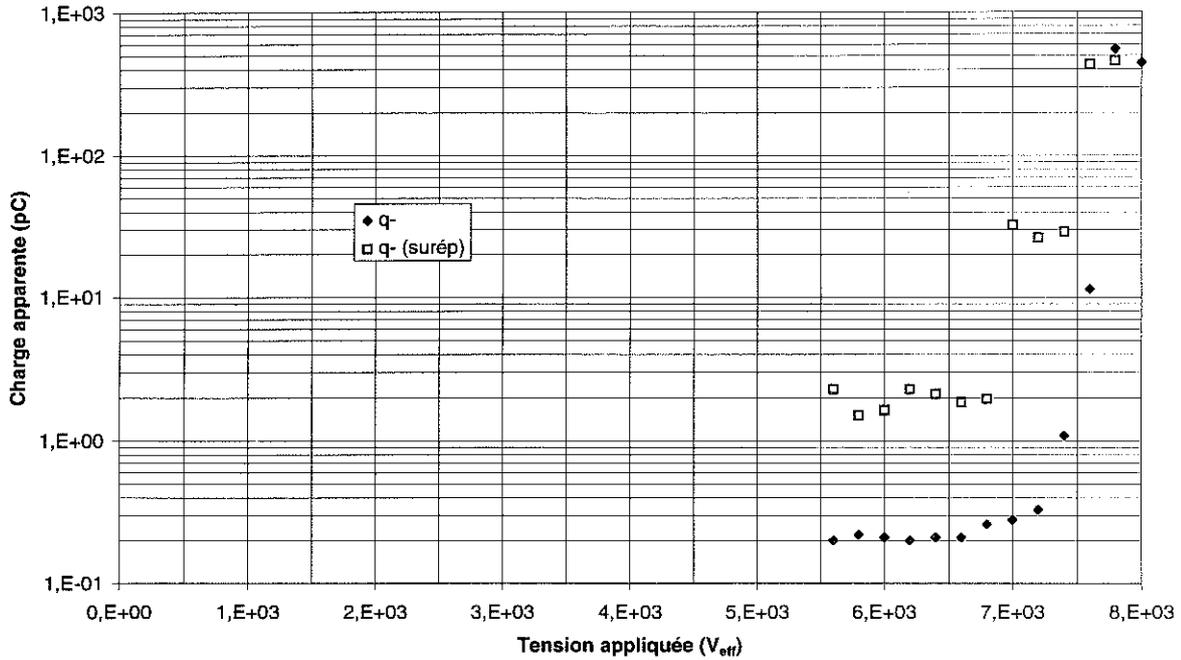


Figure 9. Evolution de la moyenne de la charge apparente en fonction de la tension appliquée. Comparaison entre le cas d'une cellule sans surépaisseur (◆) et avec surépaisseur (□) (échelle semi-log)

I. 6. b. Distributions des décharges:

Les quelques décharges partielles du 1^{er} régime qui sont détectées ont tendance à être situées vers les extrema de l'onde de tension (exemple figure 10). Il n'y a pas autant de décalage que dans le cas d'une cellule sans surépaisseur. Pour une même tension appliquée, les décharges sont moins nombreuses mais ont des amplitudes plus fortes que celles apparaissant dans une cellule sans surépaisseur.

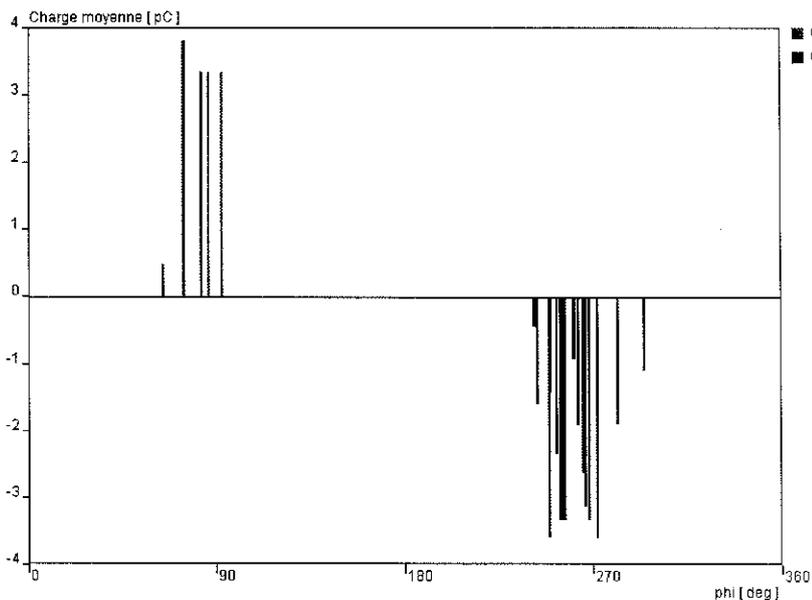


Figure 10. Distribution $Q_{moy}(\Phi)$ pour $V=6 \text{ kV}_{eff}$ (1^{er} régime)

Les décharges sont centrées sur les maxima de la tension appliquée et ont des intensités de quelques pC à quelques dizaines de pC (figure 11).

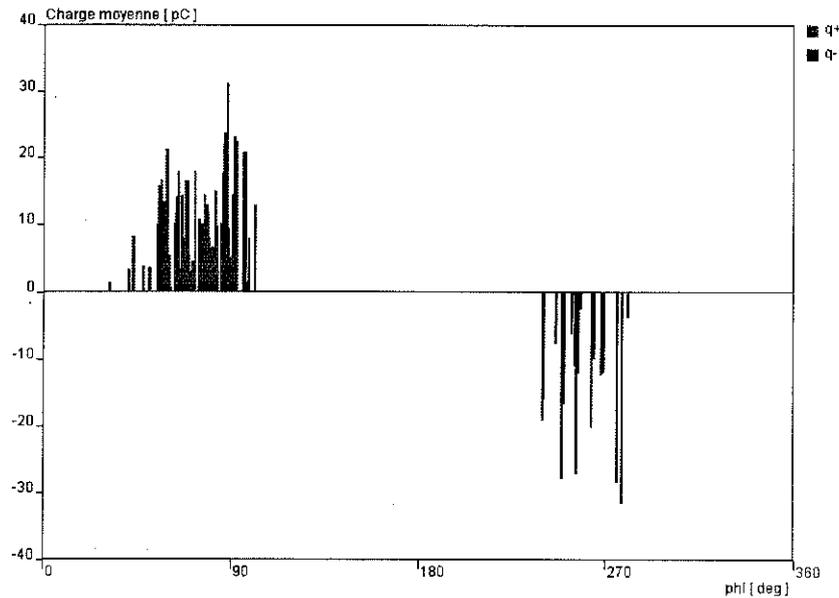


Figure 11. Distribution $Q_{\text{moy}}(\Phi)$ pour $V=7200 V_{\text{eff}}$ (1^{er} régime)

Lors du second régime, les distributions ressemblent à celles obtenues avec des cellules sans surépaisseur de liquide. C'est pour cela que nous ne donnons pas de figures de ces distributions. Ainsi on obtient les mêmes valeurs pour les coefficients statistiques.

I. 6. c. Paramètres statistiques:

Pour le 1^{er} régime, le nombre très faible de décharges mesurées (même à des tensions proches de la transition, comme par exemple pour $V=7 \text{ kV}_{\text{eff}}$ où la fréquence des décharges n'est que de 2 décharges/s) ne permet pas de faire des statistiques fiables en calculant par exemple les moments S_k et K_u . Seuls les coefficients EEF sont calculés (tableau 5).

Tension (V_{eff})	exp1	exp2	exp3	exp4
6600	0,91	0,97	0,95	0,92
7000	0,92	0,95	0,94	0,89
7200	0,56	0,92	0,65	0,92
7400		0,97		0,56
7600		0,91		
7800		0,49		

Tableau 5. Coefficient EEF pour différentes tensions et différents essais

Notons, dans le tableau 5, les valeurs du coefficient d'efficacité EEF qui sont plus fortes durant tout le 1^{er} régime que celles obtenues avec une cellule sans surépaisseur (entre 0,9 et 1 au lieu de 0,75 à 0,9).

I. 6. d. Discussion:

La présence d'une surépaisseur de liquide près des bords d'armature, modifie sensiblement le 1^{er} régime de décharges et pas le 2^{eme} régime.

Rappelons que lorsque la cellule étudiée est sans surépaisseur, l'épaisseur de liquide avoisinant le bord d'armature est égale à l'épaisseur de l'armature repliée, soit 12 μm . Dans ce cas, les distributions $Q_{\text{moy}}(\Phi)$ contiennent un fond plat de 0,2 pC de hauteur environ, sur lequel se superposent quelques pics à 1-3 pC (figure 5, annexe 5). Dans le cas où il y a une surépaisseur de liquide, seuls les pics de forte intensité persistent. L'augmentation du volume de liquide près des bords d'armature permet d'augmenter la taille des avalanches électroniques dans le liquide. Le temps d'écoulement de la charge d'espace est alors augmenté, ce qui réduit la fréquence des décharges partielles enregistrées. L'augmentation de l'épaisseur de liquide près des armatures se traduit par l'augmentation de la TEDP lors du 2^{eme} régime car les bulles créées par les avalanches sont plus facilement éliminées.

I. 7. EFFET DE LA TEMPERATURE

I. 7. a. Procédure expérimentale:

La cellule d'essai est refroidie pendant 24 heures dans une étuve à $T=-30^{\circ}\text{C}$. Au cours des nos expériences, l'alimentation en tension se fait par l'intermédiaire d'un câble blindé issu de la cage de Faraday. L'installation permet de travailler avec un niveau de bruit inférieur à 0,05 pC jusqu'à 5 kV_{eff} . Avec ces conditions, dans le cas d'une cellule avec 2 films de PP, seules les tensions de transition et de claquage peuvent être correctement mesurées. Ceci nous a contraint à faire des essais avec un seul film de PP afin d'avoir des enregistrements sans parasites.

I. 7. b. Résultats:

Les valeurs des tensions caractéristiques obtenues à $T=-30^{\circ}\text{C}$ sont données dans le tableau 6 qui suit. Ces valeurs sont des moyennes de 4 expériences différentes.

	TADP(V_{eff})	Tension de transition (V_{eff})	Tension de claquage (V_{eff})
$T=20^{\circ}\text{C}$	3700	5300	5400
$T=-30^{\circ}\text{C}$	3700	4600	4850
Ecart (%)	0	-15	-10

Tableau 6. Tensions caractéristiques avec 1 seul film de PP de 13,6 μm d'épaisseur pondérale.

La variation des tensions de transitions avec la température est très important (15%). On remarque également une influence assez importante de la température sur la tension de claquage qui, à $T=-30^{\circ}\text{C}$, ne représente que 90% de la valeur mesurée à température ambiante. Avec 2 films de PP de $13,6\ \mu\text{m}$ d'épaisseur pondérale, la tension de claquage vaut en moyenne $6100\ V_{\text{eff}}$ à $T=-30^{\circ}\text{C}$, soit une baisse de près de 28 % par rapport à la température ambiante.

1. Evolution de la fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée:

Les figures 12 et 13, obtenues avec 1 seul film de PP, comparent les résultats obtenus à $T=-30^{\circ}\text{C}$ avec ceux obtenus à $T=20^{\circ}\text{C}$.

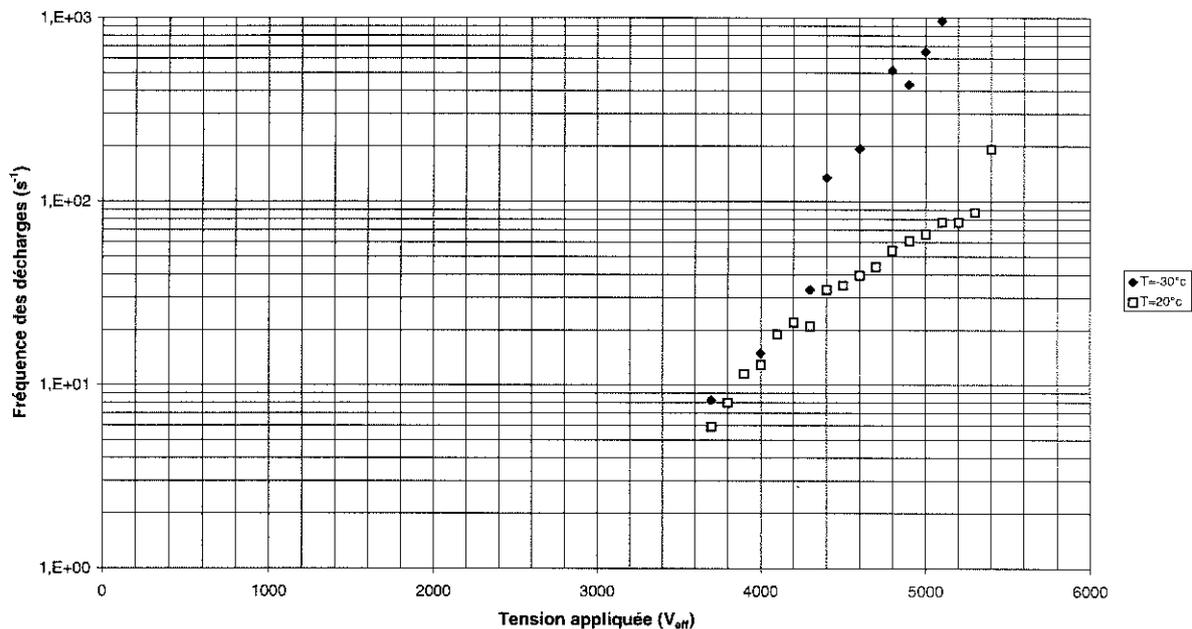


Figure 12. Fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée (échelle semi-log)

La figure 12 montre que la température n'a d'effet qu'au dessus d'une certaine tension. En effet de $V=3700\ V_{\text{eff}}$ à $V=4300\ V_{\text{eff}}$, les deux courbes se superposent. Au delà, à froid, la fréquence des décharges est augmentée. Le rapport entre les fréquences des décharges à $T=-30^{\circ}\text{C}$ et $T=20^{\circ}\text{C}$ passe alors à 5 pour $V= 4600\ V_{\text{eff}}$ et atteint environ 12 à $V=5100\ V_{\text{eff}}$, soit juste avant le claquage de la cellule à froid.

2. Evolution de l'intensité des décharges en fonction de la tension appliquée:

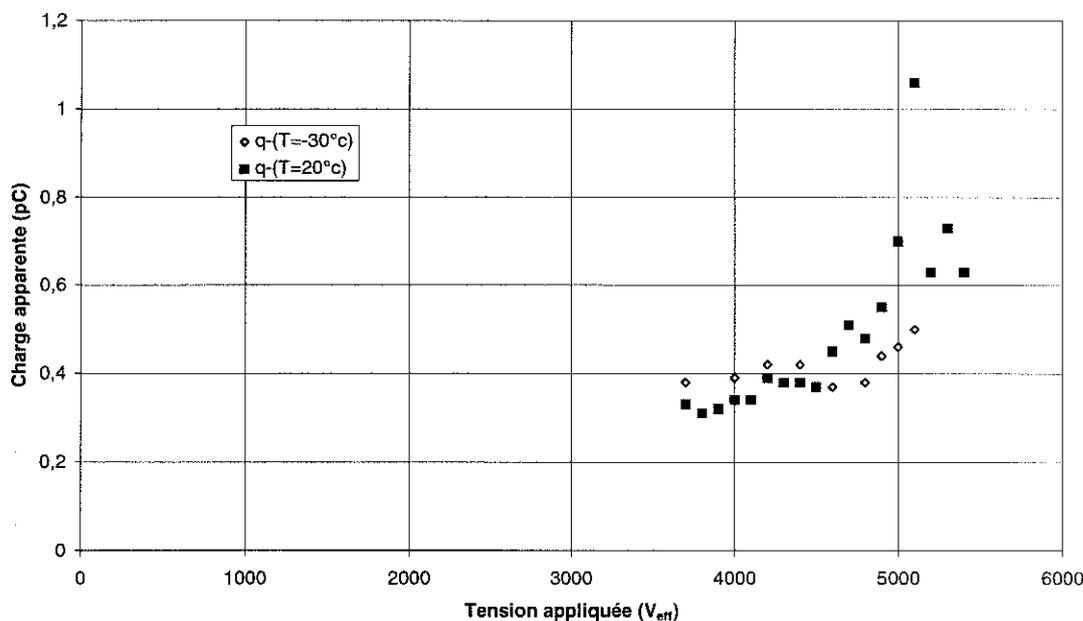


Figure 13. Evolution de la charge apparente moyenne des décharges négatives en fonction de la tension appliquée

L'influence de la température sur la charge apparente n'est pas très importante comme le montre la figure 13. On note néanmoins que la charge augmente moins rapidement avec la tension appliquée lorsque la température est égale à $T=-30^{\circ}\text{C}$.

I. 7. c. Synthèse sur l'effet de la température:

Ces résultats montrent que le froid n'a pas d'effet sur l'apparition des premières décharges conséquentes des avalanches électroniques en phase liquide. L'influence commence à se faire sentir lorsque les cavités gazeuses formées par ces avalanches ont leur durée de vie prolongée sous l'effet de l'augmentation de la viscosité du liquide [Jom97]. En effet, la viscosité du Jarylec varie fortement avec la température. Par exemple, le rapport entre les viscosités du Jarylec à $T=-30^{\circ}\text{C}$ et $T=20^{\circ}\text{C}$ est égal à 13 [Pro83].

Notons d'ailleurs que l'influence de la température se traduit par l'augmentation de la fréquence des décharges et non pas sur la charge elle-même car l'augmentation de la durée de vie d'une bulle a pour conséquence l'augmentation de la probabilité de décharge dans cette bulle. Il en résulte que le claquage, qui est vraisemblablement le résultat des décharges du second régime, survient à une tension plus basse à froid qu'à température ambiante. L'effet est plus marqué avec 2 films de PP.

Ces résultats sont à rapprocher des mesures faites par Hantouche sur des condensateurs industriels où la TADP diminue de 30% lorsque la température est diminuée de 15°C à -25°C [Han93]. Les observations faites par le même auteur sur l'augmentation du nombre de pannes

sur le parc de condensateurs EDF les matins d'hiver s'expliquent donc par le changement de viscosité du liquide avec la température et la modification du mouvement des bulles dans le liquide.

II. CELLULE DISSYMETRIQUE

II. 1. Description :

Pour dégager l'effet de polarité de la tension sur les décharges, nous avons effectué des essais avec une cellule dont les armatures ont des épaisseurs différentes (une des deux armatures est coupée et a une épaisseur de 6 μm tandis que l'autre est repliée et a une épaisseur de 112 μm). On limite ainsi l'apparition des décharges sur l'armature de 6 μm . Un schéma en perspective de la cellule est présenté ci dessous. L'armature de plus faible épaisseur est reliée à la haute tension.

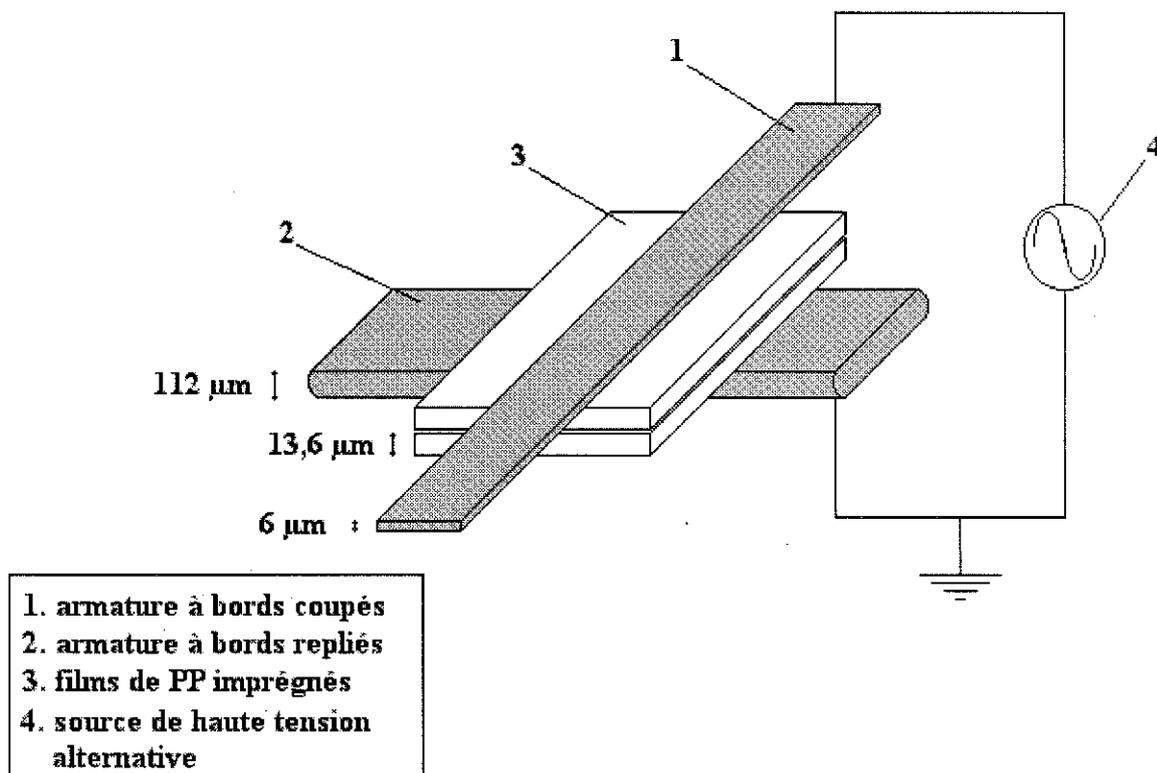


Figure 15. Schéma en perspective d'une cellule dissymétrique

II. 2. Tension d'apparition des décharges partielles :

Selon le critère de fréquence précédemment défini, la TADP obtenue dans une cellule dissymétrique comprenant deux films de polypropylène de 13,6 μm imprégnés au Jarylec est :

$$TADP = 4 \pm 0,2 \text{ kV}_{\text{eff}}$$

Le champ correspondant en bord d'armature coupée vaut:

$$E_s = 3,7 \pm 0,5 \text{ MV/cm}$$

C'est la valeur obtenue avec des armatures repliées ($12\ \mu\text{m}$ d'épaisseur). Ajoutons que le rapport entre la TADP avec armatures repliées ($5,6\ \text{kV}_{\text{eff}}$) et la TADP avec armatures coupées ($4\ \text{kV}_{\text{eff}}$) est d'environ $1,4 \approx \sqrt{2}$ qui est égal à la racine carrée du rapport des épaisseurs des deux armatures (repliée / non repliée). Ce qui est en bon accord avec la formule (III-1) du champ électrique sur le bord d'armature et suggère que la forme du bord d'armature n'a pas d'effet sur la génération des décharges.

Nous avons vérifié que quelque soit la tension, les phénomènes décrits dans cette partie sont circonscrits au niveau de l'armature de plus faible épaisseur. En utilisant la valeur du champ seuil et la formule (III-1), la TADP sur l'armature de $112\ \mu\text{m}$ est estimée à environ $15,6\ \text{kV}_{\text{eff}}$, soit une valeur supérieure à la tension maximale délivrée par la source HT qui est de $12,5\ \text{kV}_{\text{eff}}$. Lorsqu'on observe à l'aide d'une caméra les bords de l'armature de $112\ \mu\text{m}$, on ne détecte aucune lumière contrairement à ce que l'on observe sur l'armature de $6\ \mu\text{m}$.

II. 3. Evolution des DP en fonction de la tension appliquée :

Nos mesures de décharges à différentes tensions font apparaître l'existence des deux régimes de décharges que nous avons décrits dans la géométrie symétrique.

Les figures 16 et 17 représentent respectivement l'évolution en fonction de la tension appliquée de la fréquence moyenne des décharges partielles et de leur charge apparente moyenne. Les valeurs qui y sont reportées sont des moyennes sur 5 expériences effectuées avec des cellules différentes.

a. Fréquence des décharges:

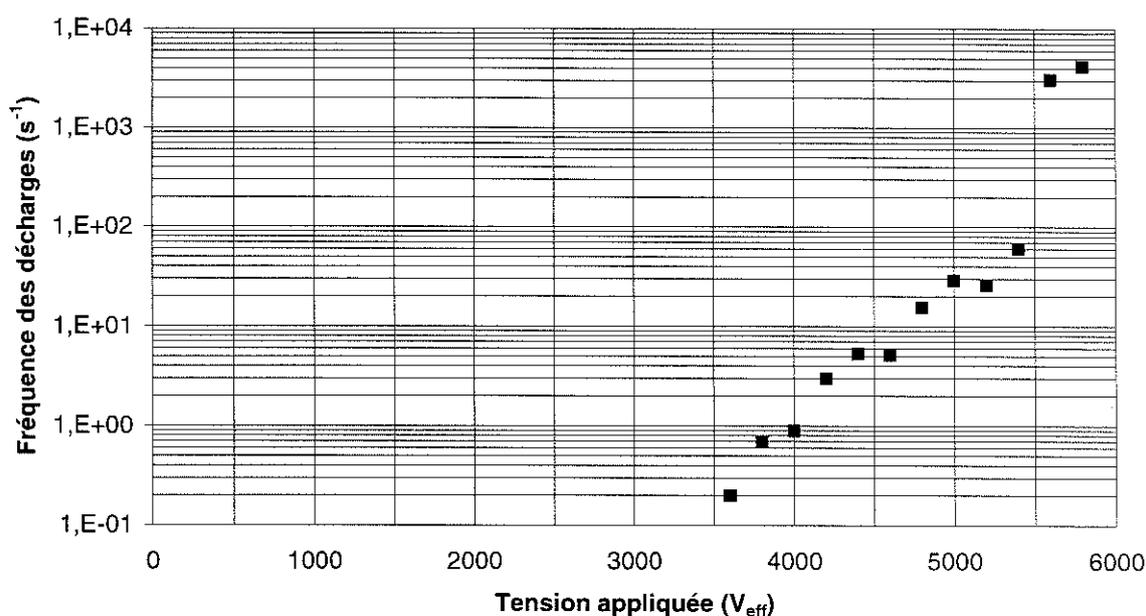


Figure 16. Evolution de la fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée (échelle semi-log).

Pour les tensions inférieures à 3600 V_{eff} , aucune décharge n'a été détectée. Puis au delà, deux domaines de tension peuvent être distingués (figure 16). Dans un premier domaine qui s'étend de $V=3600$ à $V=5400 V_{eff}$, les points expérimentaux sont alignés. La fréquence passe de 0,2 à 60 décharges par seconde. Entre $V=5400$ et $V=5600V_{eff}$, la fréquence des décharges est multipliée par un facteur 50 passant ainsi à 3000 décharges par seconde. Puis le claquage de la cellule survient quelques secondes après que la tension appliquée ait atteint 5800 V_{eff} .

Nous remarquons que le logarithme de la fréquence des décharges du 1^{er} régime a une allure linéaire en fonction de la tension appliquée. L'équation de cette courbe déduite de la figure 16 est la suivante :

$$f = e^{0,003(V-3956)} = e^{0,003(V-TADP)}$$

Avec la cellule symétrique, nous avons obtenu le même type d'équation : $f = e^{\alpha(V-TADP)}$ avec $\alpha=0,0016$ au lieu de 0,003.

b. Amplitude des décharges :

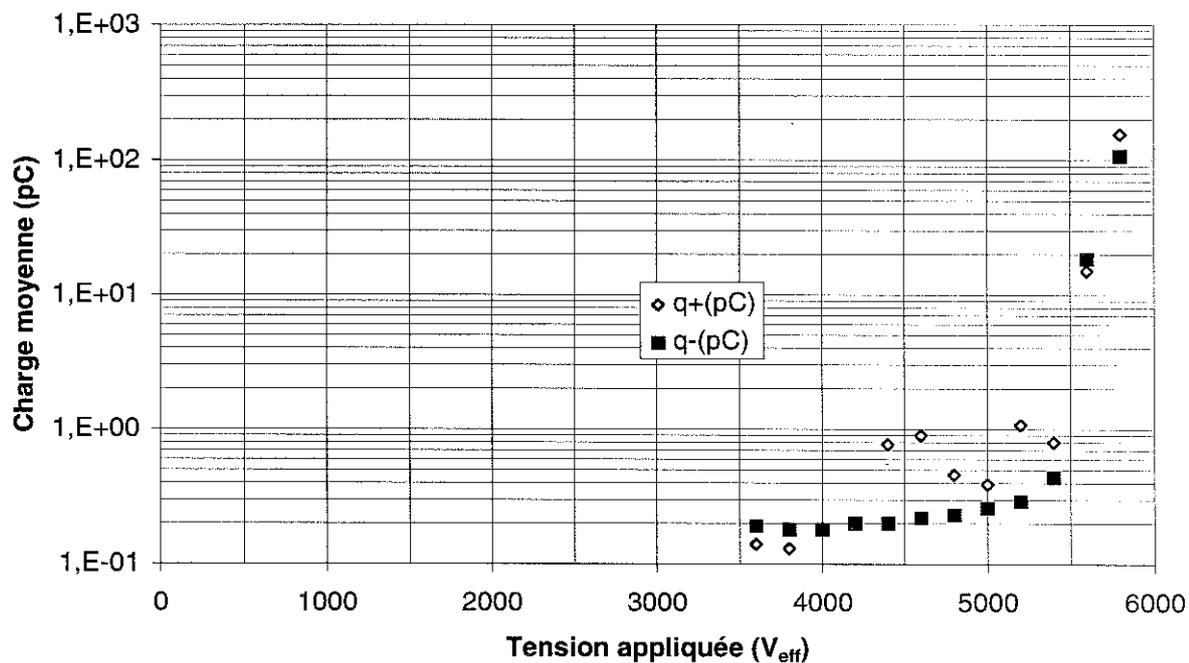


Figure 17. Evolution de la charge apparente des décharges en fonction de la tension appliquée. Charges moyennes des décharges positives (\diamond) et des décharges négatives (\blacksquare) (échelle semi-log).

Sur la figure 17 sont représentées les variations des charges apparentes moyennes positives et négatives en fonction de la tension. L'évolution des charges négatives est très régulière contrairement à celle des charges positives qui montrent une grande dispersion des

valeurs notamment dans le premier domaine de tension, de $V=3600 V_{\text{eff}}$ à $V=5400 V_{\text{eff}}$. Cette dispersion peut s'expliquer par le faible nombre de décharges positives enregistrées dans ce domaine de tension (voir tableau 7). La charge moyenne négative augmente très légèrement en valeur absolue, passant de $-0,2 \text{ pC}$ à $V=3600 V_{\text{eff}}$ à $-0,45 \text{ pC}$ à $V=5400 V_{\text{eff}}$. Sa valeur reste principalement comprise entre $-0,2$ et $-0,3 \text{ pC}$ dans ce premier domaine de tension avec une augmentation à $V=5400 V_{\text{eff}}$, puis après un saut de deux décades environ, elle atteint quelques centaines de pC dans le second domaine de tension. Les charges positives augmentent également très fortement entre $V=5400$ et $V=5600 V_{\text{eff}}$.

Si l'on compare ces résultats avec ceux obtenus avec la structure symétrique, les décharges partielles du 1^{er} régime ont des charges du même ordre de grandeur. Par contre, celles du 2^{ème} régime ont des intensités plus importantes. Ce qui pourrait s'expliquer par le fait que le volume de liquide près des bords d'armatures, plus important avec des armatures repliées, permet la formation de bulles de dimensions plus importantes.

c. Répartition des décharges en fonction de leur signe :

Le tableau 7 ci-après présente l'évolution en fonction de la tension appliquée, du nombre de décharges positives (n_+), négatives (n_-), et du rapport de ces deux nombres :

$V(V_{\text{eff}})$	n_+	n_-	$\frac{n_+}{n_-}$
3600	5	55	0,09
3800	10	187	0,05
4000	26	224	0,12
4200	10	872	0,01
4400	70	1520	0,05
4600	31	1522	0,02
4800	22	4653	0,01
5000	29	8771	0,003
5200	122	7719	0,02
5400	85	13270	0,01
5600	13857	21327	0,65
5800	5383	7505	0,72

Tableau 7. Evolution du rapport $\frac{n_+}{n_-}$ en fonction de la tension appliquée avec une cellule dissymétrique.

Ce tableau permet de définir deux domaines de tension. Dans le premier, le rapport $\frac{n_+}{n_-}$ est compris entre 0 et 0,1. Puis la valeur augmente fortement lors de la transition entre les deux domaines de tension et tend vers 1. Autrement dit, le 1^{er} régime de décharges est caractérisé par une prédominance des décharges négatives comme en pointe-plan dans un

liquide hydrocarbure [Bro94]. Lors du second régime de décharges, le nombre de décharges positives augmente fortement et tend à égaler le nombre de décharges négatives.

II. 4. Distributions des décharges :

Les distributions que nous présentons sont les distributions du nombre de décharges et de la charge moyenne par position en fonction de la phase soient respectivement $n(\Phi)$ et $Q_{\text{moy}}(\Phi)$ et la distribution de la probabilité d'une décharge $P_0(Q)$.

Pour chaque type de distribution nous donnons un exemple représentatif de chaque régime de décharges.

II. 4. a. Distribution du nombre de décharges par position en fonction de la phase :

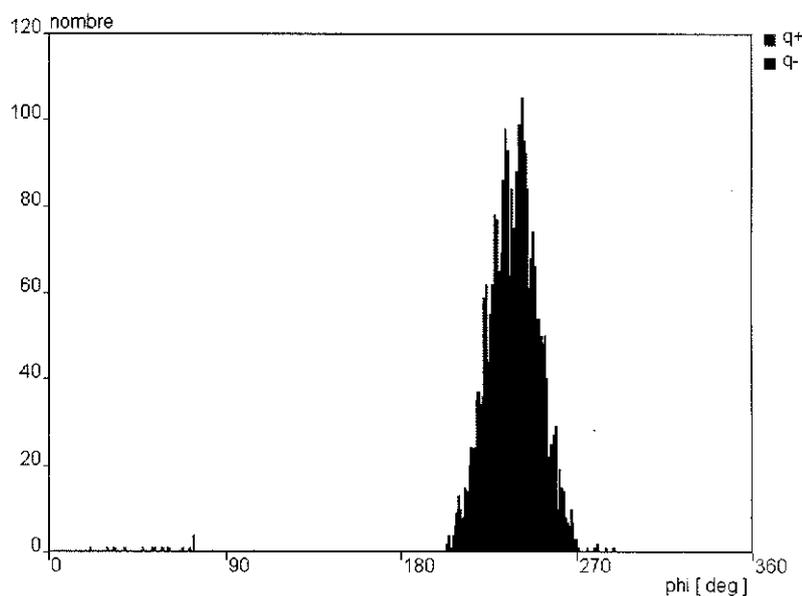


Figure 18. Distribution $n(\Phi)$ pour $V=4800 V_{\text{eff}}$

La figure 18 correspondant au 1^{er} régime de décharges montre que les décharges positives sont très peu nombreuses. Les décharges négatives ont un pic vers 240°. De part et d'autre de ce maximum, la distribution est symétrique.

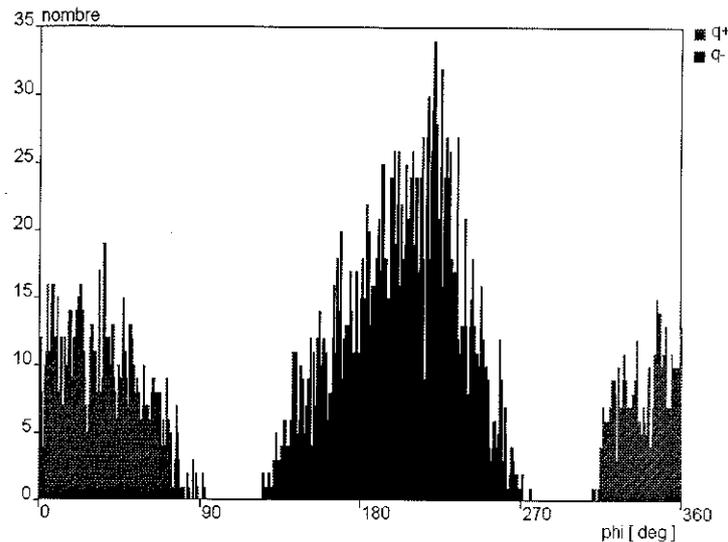


Figure 19. Distribution $n(\Phi)$ pour $V=5800 V_{eff}$

La figure 19 correspondant au 2^{ème} régime de décharges a été obtenue pour $V=5800 V_{eff}$, juste avant le claquage de la cellule. On remarque que les distributions positive et négative ont la même allure, il y a quasiment autant de décharges positives que de décharges négatives. Les distributions sont similaires à celles obtenues avec une cellule symétrique (Annexe 5). Elles sont nettement décalées vers la gauche par rapport aux sommets de la tension.

Nous verrons par la suite que la différence de forme de ces distributions du 1^{er} et du 2^{ème} régime se traduit par une différence dans les valeurs de certains coefficients statistiques.

II. 4. b. Distribution de la charge apparente moyenne par position en fonction de la phase :

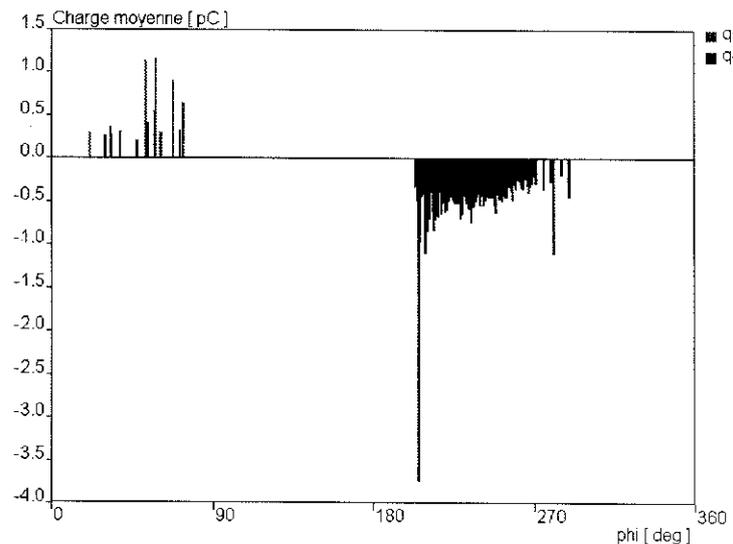


Figure 20. Distribution $Q_{moy}(\Phi)$ pour $V=4800 V_{eff}$

La figure 20 qui correspond aux décharges du 1^{er} régime, confirme ce qui a été observé avec la distribution du nombre de décharges, à savoir la prépondérance des décharges négatives. Les décharges positives ont des charges assez dispersées. Les décharges négatives ont des charges de quelques dixièmes de pC, avec la présence de quelques décharges dont l'intensité est relativement importante (-3,5 pC). Ces dernières sont généralement situées au début de la distribution. Il existe une similitude avec les décharges en pointe-plan dans un liquide, aussi bien dans l'allure des distributions que dans l'ordre de grandeur des charges mesurées [Bro94].

La figure 21 correspond aux décharges du 2^{eme} régime. Elle montre l'élargissement des distributions et leur décalage vers la gauche. Les décharges ont en moyenne des intensités de quelques centaines de pC.

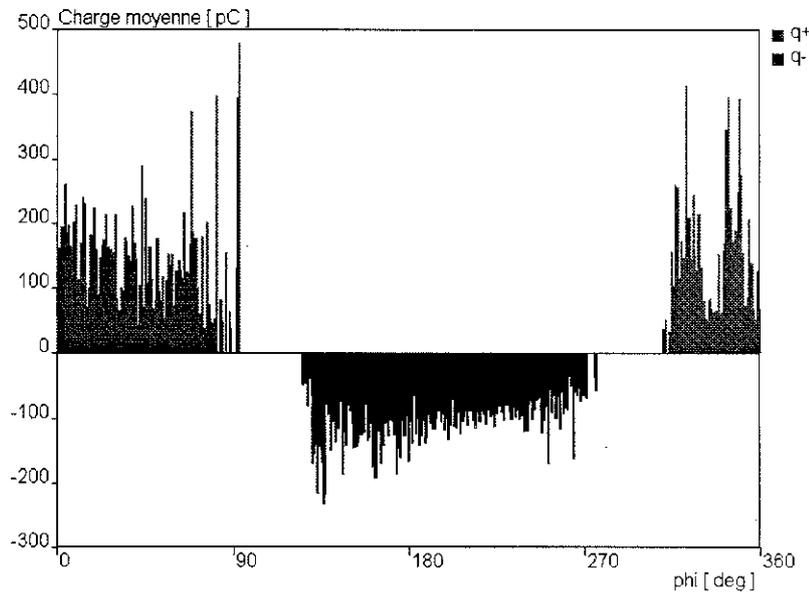
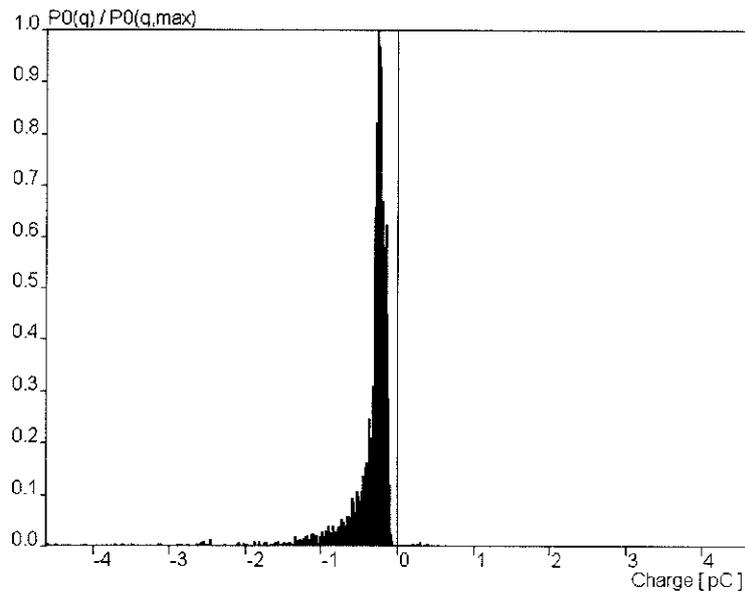


Figure 21. Distribution $Q_{moy}(\Phi)$ pour $V=5800 V_{eff}$

II. 4. c. Distribution de la probabilité de la charge d'une décharge partielle :

L'exemple de la figure 22 représente la distribution $P_0(Q)$ pour les décharges négatives du 1^{er} régime. Cette distribution présente un pic à -0,25 pC. C'est la charge la plus probable.

Figure 22. Distribution $P_0(Q)$ pour $V=4800 V_{eff}$

II. 5. Paramètres statistiques :

Les valeurs des coefficients statistiques que nous donnons dans ce qui suit, ont été obtenues sur des cellules dissymétriques contenant 2 films de $13,6 \mu\text{m}$. Les mêmes valeurs sont obtenues quelque soit l'épaisseur de PP.

II. 5. a. Coefficients statistiques de la distribution $n(\Phi)$:

$V(V_{eff})$	Sk_{n+}	Sk_{n-}	Ku_{n+}	Ku_{n-}	Pos_{n+}	Pos_{n-}
4000		-0,27		0,85		0,33
4200		0,27		1,29		0,34
4400		0,2		1,32		0,33
4600		-0,3		0,72		0,33
4800		-0,4		1,12		0,33
5000		-0,4		1,09		0,33
5200		-0,21		0,4		0,32
5400		0,01		0		0,31
5600	-0,04	-0,04	-0,24	-0,25	0,19	0,22
5800	-0,1	-0,3	-0,8	-0,7	0,15	0,13

Tableau 8. Paramètres statistiques de la distribution $n(\Phi)$

Le coefficient de position des décharges négatives est quasiment constant entre 4 kV_{eff} et $5,4 \text{ kV}_{eff}$ puis diminue sensiblement à partir de $5,6 \text{ kV}_{eff}$, ce qui correspond à la transition au second régime de décharges. Ceci illustre le déplacement de la distribution $n(\Phi)$ vers la

gauche lorsqu'on passe du 1^{er} au 2^{eme} régime. On remarque que les valeurs de ce coefficient sont du même ordre pour les décharges positives et négatives du 2^{eme} régime.

Les moments d'ordre 3 et 4 ont des valeurs plus dispersées que celles du coefficient de position. Cependant, certaines tendances peuvent être dégagées :

- Pour les moments d'ordre 3 (Skewness), les valeurs sont proches de 0 (à 0,4 près) mais il n'y a pas de changement de valeur entre les deux régimes de décharges. De telles valeurs pour le Skewness signifient que la distribution est symétrique par rapport à sa moyenne avec un léger décalage vers la droite ou vers la gauche selon que le paramètre est positif ou négatif.
- Pour les moments d'ordre 4, on constate un changement de valeur (pour les décharges négatives) avec, lors du 1^{er} régime des valeurs comprises entre 0,4 et 1,3, ce qui signifie que les distributions ont des allures assez pointues. Il y a une tendance à la baisse lorsque la tension appliquée est augmentée, puis lors du 2^{eme} régime de décharges, on obtient des valeurs négatives et inférieures à 1 en valeur absolue, ce qui signifie que la forme des distributions est plutôt arrondie. La valeur intermédiaire obtenue pour $V=5,4$ kV_{eff} est due au fait que cette tension est proche de la transition.

II. 5. b. Coefficients statistiques de la distribution $Q_{moy}(\Phi)$:

V(V _{eff})	Sk _{q+}	Sk _{q-}	Ku _{q+}	Ku _{q-}	Pos _{q+}	Pos _{q-}
4000		0,37		-0,54		0,33
4200		0,31		-0,46		0,33
4400		0,45		-0,49		0,33
4600		0,16		-0,8		0,32
4800		0,47		-0,7		0,32
5000		0,29		-0,96		0,32
5200		0,51		-0,66		0,30
5400		0,26		-0,78		0,25
5600	0,02	0,33	-1,07	-0,98	0,19	0,21
5800	-0,2	-0,29	-0,8	-0,93	0,13	0,14

Tableau 9. Paramètres statistiques de la distribution $Q_{moy}(\Phi)$

Les mêmes remarques concernant les coefficients de position de $n(\Phi)$ peuvent être faites pour ceux de la distribution $Q_{moy}(\Phi)$. En effet ces coefficients marquent de façon très claire la transition entre les deux régimes de décharges.

Les moments d'ordre 3 et 4 ne sont pas d'un grand apport pour la caractérisation de ces décharges. Les valeurs du Kurtosis sont assez dispersées et ne permettent pas de voir une évolution nette lors du 2^{eme} régime. Les valeurs du Skewness des décharges négatives du 1^{er}

régime signifient que ces décharges ont des distributions décalées vers la gauche. Ceci est dû à la présence de fortes décharges au début de la distribution. Pour ce même coefficient, aucune tendance ne se dégage pour les décharges du 2^{ème} régime.

II. 5. c. Coefficient d'efficacité énergétique ou EEF :

Lorsque les décharges apparaissent aux sommets de la tension alternative, le coefficient EEF vaut 1. C'est pratiquement le cas des décharges entre pointe et plan dans le liquide. Les valeurs obtenues pour les décharges dans le modèle de condensateur sont reportées sur la figure 23.

Les décharges du 1^{er} régime ont un coefficient EEF compris entre 0,75 et 0,85. La transition vers le second régime est marquée par la diminution de EEF qui vaut 0,45 pour $V=5800 V_{eff}$, soit juste avant le claquage.

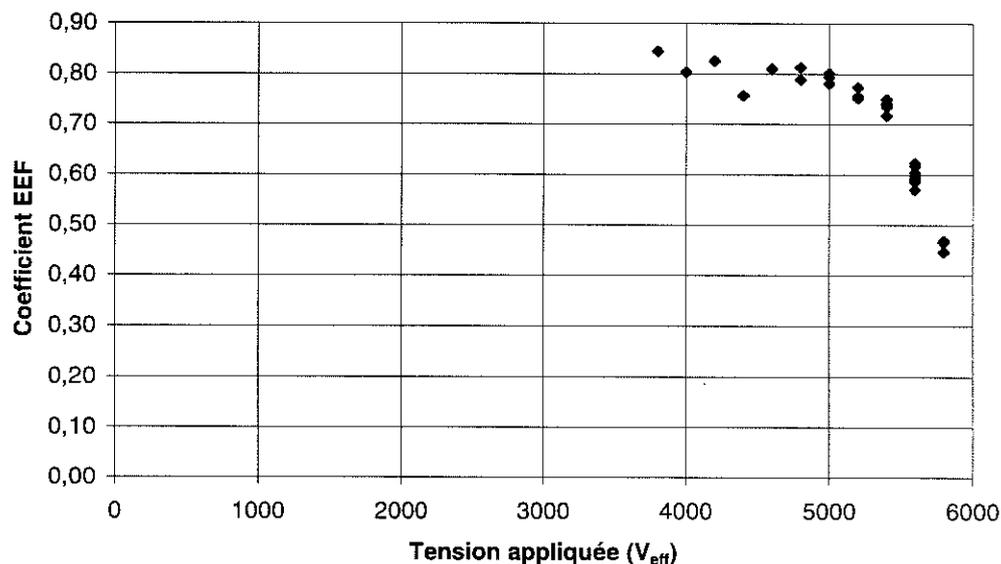


Figure 23. Evolution du coefficient EEF en fonction de la tension appliquée

En comparant les valeurs des coefficients statistiques obtenues avec une cellule symétrique et une cellule dissymétrique, on remarque que certains paramètres ont les mêmes valeurs ou un domaine de chevauchement très important, comme le coefficient EEF ou les coefficients de position. Les moments d'ordre 3 et 4 sont un peu plus dispersés.

II. 6. EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE PP

Nous avons étudié l'influence de l'épaisseur du diélectrique sur les principales caractéristiques des décharges partielles : la tension d'apparition des décharges, la tension de transition entre les deux régimes de décharges, la fréquence des décharges, leur charge apparente, l'allure des distributions statistiques. Nous avons effectué des essais avec 1, 2, 3, 4

ou 5 films de polypropylène rugueux de 13,6 μm et également avec 1 seul film lisse de 100 μm d'épaisseur.

a. Influence de l'épaisseur de PP sur la fréquence des décharges :

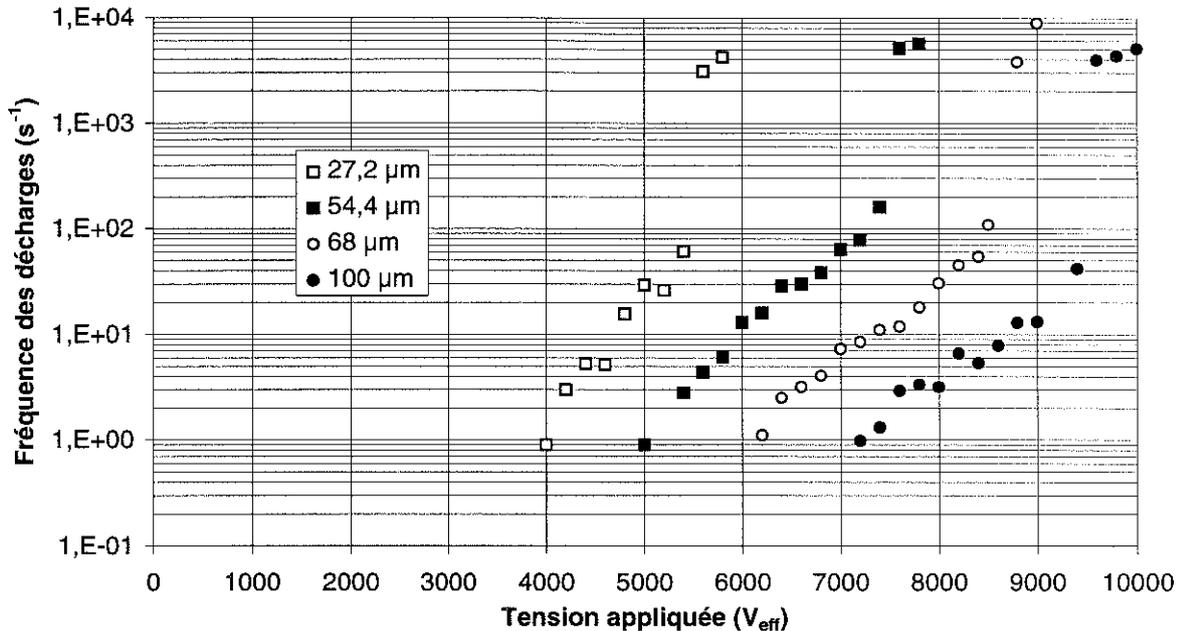


Figure 24. Fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée pour différentes épaisseurs de PP

Dans un souci de clarté, nous n'avons pas représenté sur la figure 24 les courbes correspondant à 1 et 3 films de PP. Nous donnons néanmoins les valeurs des tensions caractéristiques pour ces deux cas dans le tableau 10.

On note une évolution exponentielle de la fréquence sur un premier domaine de tension, puis une augmentation brutale d'environ 2 décades et au delà, des fréquences de quelques kHz caractéristiques du second régime de décharges. Celui-ci se termine par le claquage de la cellule.

Lors du premier régime de décharge, la fréquence des décharges varie en fonction de la tension appliquée en suivant une allure exponentielle, et ce quelque soit l'épaisseur de polypropylène. Si f est la fréquence moyenne des décharges partielles en s^{-1} et V est la tension appliquée à la cellule, on a alors :

$$f = Ae^{\alpha V} \quad (\text{III-2})$$

Les valeurs de α ont été déterminées à partir des courbes expérimentales pour différentes épaisseurs de polypropylène :

épaisseur pondérale de PP (μm)	α (V^{-1})	A	$-\ln(A)/\alpha$	TADP (V_{eff})
13,6	0,0024	$1,4 \cdot 10^{-3}$	2738	2800
27,2	0,003	$7 \cdot 10^{-6}$	3957	4000
40,8	0,0021	$2 \cdot 10^{-5}$	5152	4500
54,4	0,002	$6 \cdot 10^{-5}$	4860	5100
68	0,0017	$3 \cdot 10^{-5}$	6128	6200
100	0,0015	$2 \cdot 10^{-5}$	7213	7200

Tableau 10. Détermination des coefficients α et A de l'équation (III-2).

Le tableau 10 montre une très bonne corrélation entre la valeur de la TADP et le rapport $-\ln(A)/\alpha$, c'est ce qui prouve la validité de l'expression de la fréquence moyenne des décharges partielles du 1^{er} régime en fonction de la tension appliquée sous forme exponentielle quelque soit l'épaisseur de polypropylène étudiée.

On peut écrire alors :

$$f = e^{\alpha(V-TADP)}$$

α est un coefficient qui ne varie pas beaucoup avec l'épaisseur de PP (dans la gamme étudiée) et vaut entre $1,5 \cdot 10^{-3}$ et $3 \cdot 10^{-3}$.

b. Influence de l'épaisseur de PP sur l'intensité des décharges :

L'évolution de la charge apparente moyenne des décharges partielles en fonction de la tension appliquée, pour différentes épaisseurs de PP est présentée sur la figure 25.

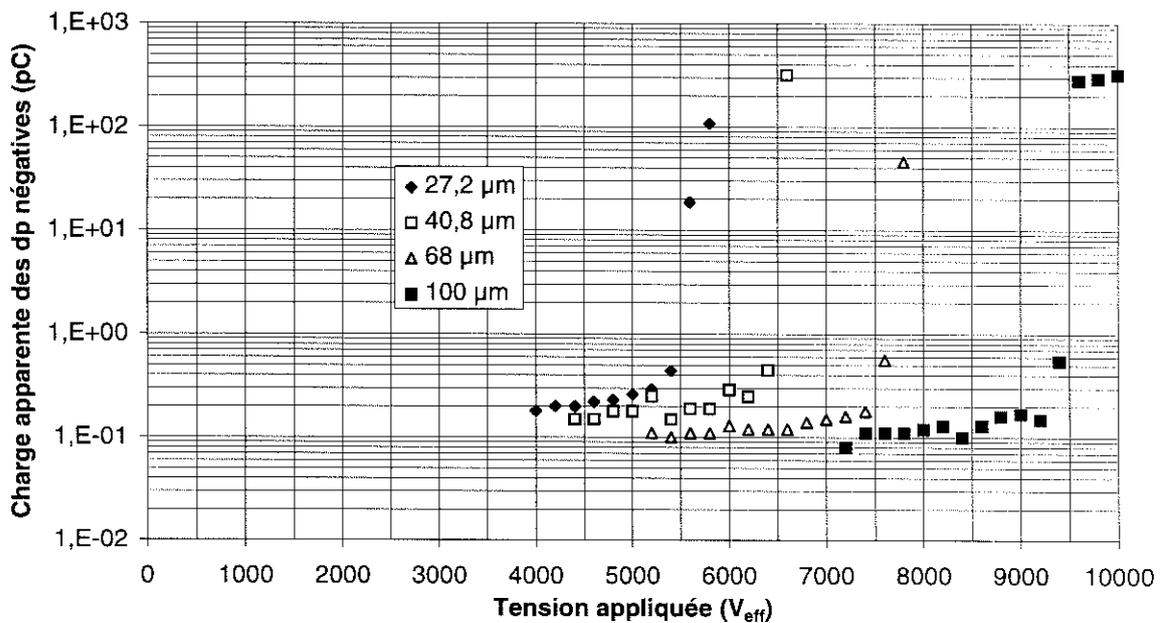


Figure 25. Charge apparente moyenne des décharges partielles négatives en fonction de la tension appliquée, pour plusieurs épaisseurs de PP

On note une légère diminution de la charge apparente des décharges du 1^{er} régime lorsque l'épaisseur de PP augmente. Ceci est en accord avec l'expression de la charge apparente en fonction de l'épaisseur de PP déduite du modèle a-b-c (Chapitre I). En effet lorsque l'épaisseur x de PP augmente, la capacité b du modèle a-b-c qui correspond au PP diminue comme $b \approx \frac{k}{x}$. On a alors:

$$q_{app} = \frac{1}{1 + \frac{c}{k}x} q$$

c. Influence de l'épaisseur de PP sur les tensions caractéristiques :

Nous pouvons déduire des courbes 24 et 25, les tensions d'apparition des décharges partielles, de transition du 1^{er} au 2^{eme} régime de décharge et de claquage pour l'ensemble des épaisseurs de PP étudiées. Ces tensions sont reportées dans le tableau 11 :

épaisseur pondérale sauf pour le film de 100 μm qui est lisse	TADP (V_{eff})	Tension de transition (V_{eff})	Tension de claquage (V_{eff})
13,6	2800	3900	3900
27,2	4000	5600	5800
40,8	4500	6400	6600
54,4	5100	7500	7800
68	6200	8600	9000
100	7200	9500	10000

Tableau 11. Effet de l'épaisseur de PP sur les tensions caractéristiques des décharges partielles dans un modèle de condensateur tout film imprégné avec armatures d'épaisseurs différentes

La figure 26 représente l'évolution des tensions caractéristiques en fonction de la racine carrée de l'épaisseur mesurée de polypropylène en $(\mu\text{m})^{0.5}$. On remarque que ces tensions sont proportionnelles à la racine carrée de l'épaisseur de polypropylène.

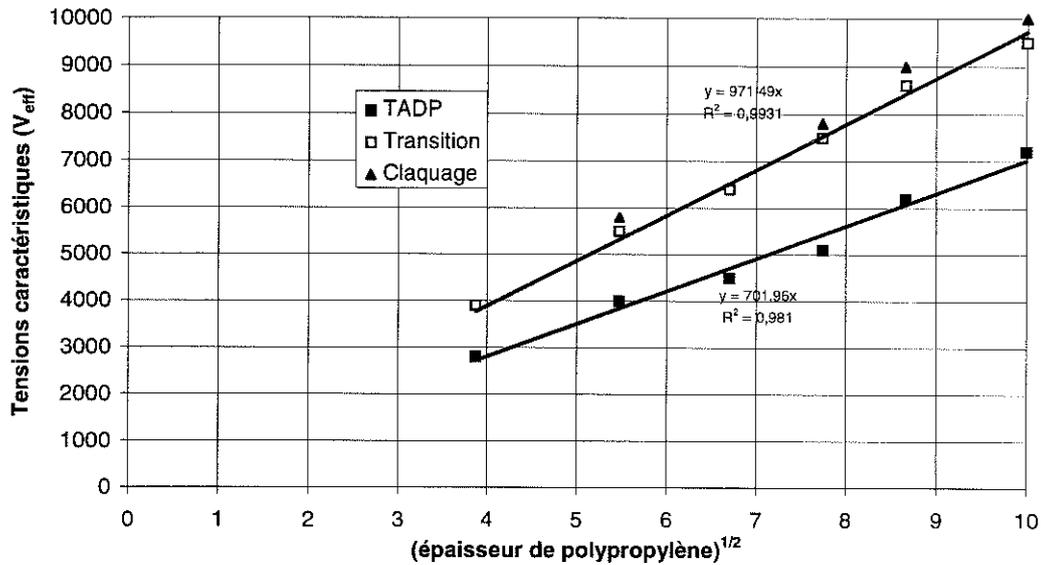


Figure 26. Tensions caractéristiques en fonction de la racine carrée de l'épaisseur de PP.

On en déduit les équations suivantes :

$$TADP = 702\sqrt{d} \text{ et } V_{transition} = 971\sqrt{d}, \text{ les tensions sont en } V_{eff} \text{ et } d \text{ est en } \mu\text{m}.$$

A partir des tensions seuils ($TADP$ et $T_{transition}$), nous avons calculé les champs électriques seuils E_s sur le bord d'armature coupé lors de l'apparition des décharges partielles et E_t lors de la transition entre les deux régimes de décharges: Pour cela nous avons utilisé la formule (III-1) en prenant en compte le facteur d'espace qui est déduit de la mesure des capacités avant et après imprégnation, comme nous l'avons explicité en annexe 3. Dans le tableau 12, nous donnons les valeurs de ces champs seuils :

Épaisseur de PP (μm)	E_s (MV/cm)	E_t (MV/cm)	E_t/E_s
15	3,6	5	1,39
30	3,7	5,2	1,41
45	3,5	5	1,42
60	3,5	5,1	1,47
75	3,6	5	1,39
100	3,6	4,8	1,32

Tableau 12. Champs seuils sur le bord d'armature

On obtient des valeurs de E_s et E_t indépendantes de l'épaisseur de PP.

En utilisant la formule (III-1) où d est l'épaisseur de PP, V_s est la TADP, on peut écrire :

$$V_s = k\sqrt{d}, \text{ avec } k = E_s \sqrt{\frac{a\epsilon_l}{\epsilon_{pp}}}, \text{ soit } k = 2,7.E_s, \text{ k est exprimé en } V.\mu\text{m}^{-0,5}$$

II. 7. Evolution des DP en fonction du temps à tension constante :

II. 7. a. Tension d'apparition par décharge $V_{inc}(q_i)$:

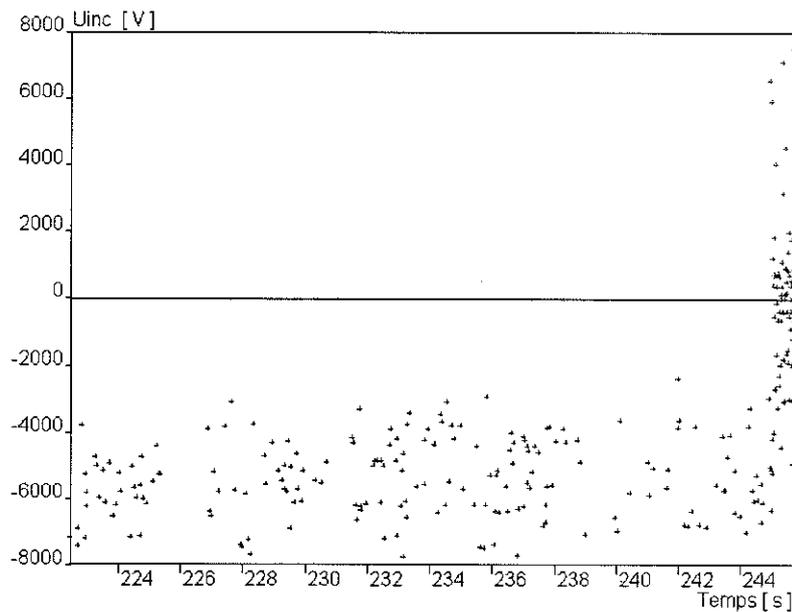


Figure 27. $V_{inc}(q_i)$ pour $V=5600$ Veff, lors de la transition

Lorsque la tension appliquée à la cellule est égale au seuil de transition entre les deux régimes de décharges, on observe une diminution (en valeur absolue) de $V_{inc}(t)$. Les décharges apparaissent alors à des tensions de quelques centaines de Volt (figure 27).

II. 7. b. Charge apparente des décharges partielles :

Lorsqu'on atteint le seuil de transition entre les deux régimes de décharges (figure 28), on remarque que l'on passe de décharges de faible amplitude à des décharges nettement plus intenses. La transition s'opère à $t=245$ s sur la figure 28. Les décharges apparaissant après sont très concentrées traduisant une augmentation importante de leur fréquence.

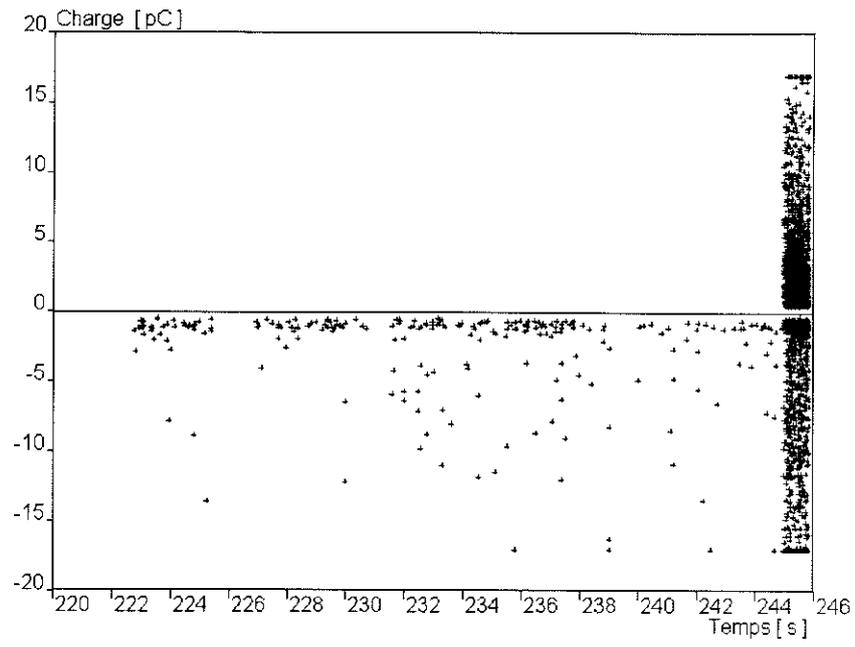


Figure 28. $q(t)$ pour $V=5600 V_{\text{eff}}$ lors de la transition

III. VIEILLISSEMENT D'UNE CELLULE SANS DÉFAUT

III. 1. Protocole de vieillissement :

Le dispositif expérimental de vieillissement est décrit dans le paragraphe IV. 4 du chapitre II. Les cellules utilisées pour les essais de vieillissement sont composées de 2 films de PP de 13,6 μm d'épaisseur pondérale. Les deux armatures en aluminium ont la même épaisseur (6 μm) et ont des bords repliés (cellule symétrique).

Les cellules préalablement imprégnées au Jarylec sous vide sont soumises à un régime de vieillissement accéléré, sous contraintes thermique et électrique. Les caractéristiques du vieillissement appliqué sont rappelées dans le tableau 13 ci dessous. Ces caractéristiques correspondent, pour ce qui est de la tension et de la température, au test de vieillissement appliqué par EDF [Han95].

Durée (jours)	Température ($^{\circ}\text{C}$)	Tension	Tension (V_{eff})	Gradient ($V/\mu\text{m}$)
90	75	$1,4.U_n$	3150	105

Tableau 13. Caractéristiques du vieillissement accéléré

Le temps de vieillissement équivalent t_s est donné par la formule suivante [Han95]:

$$t_s = t_{\text{essai}} \cdot K_T \cdot K_U$$

t_{essai} étant la durée effective du vieillissement, K_T et K_U , sont respectivement les coefficients d'accélération thermique et électrique. Les coefficients d'accélération sont donnés par les formules suivantes :

$$\begin{cases} K_T = 2^{\frac{\Delta T}{15}} \\ K_U = \left(\frac{U}{1,05 \cdot U_n} \right)^n \end{cases}$$

$$\Delta T = T - T_{\text{amb}} \text{ où } T = 75^{\circ}\text{C} \text{ et } T_{\text{amb}} = 20^{\circ}\text{C}$$

U est la tension de l'essai, U_n est la tension nominale déduite à partir du gradient nominal qui est de 75 $V/\mu\text{m}$ (voir annexe 1), et n est une constante. On prendra $n=7$.

Ce qui nous donne :

$$K_U = 7,5 \text{ et } K_T = 12,7$$

$$\text{soit : } t_s = 95,3 \cdot t_{\text{essai}}$$

$$t_s = 8577 \text{ jours} = 23,5 \text{ ans}$$

III. 2. Résultats :

Nous avons tout d'abord effectué des acquisitions de décharges partielles sur les cellules vieilles. Nous avons par la suite étudié des cellules contenant des films de PP neufs imprégnés avec le liquide récupéré dans les cellules vieilles.

III. 2. a. Décharges partielles dans une cellule vieillie :

Le tableau 14 donne les valeurs des tensions obtenues avec 4 cellules différentes.

	TADP* (V_{eff})	TADP f>1Hz (V_{eff})	Tension de transition (V_{eff})	Tension de claquage (V_{eff})
Expérience 1	6700	7800	7800	7800
Expérience 2	6600	7700	7900	7900
Expérience 3	7000	7900	8000	8100
Expérience 4	6900	7900	8000	8000
Moyenne	6800	7825	7920	7950
Ecart avec CNV**		+40 %	+5,6 %	négligeable
*tension à partir de laquelle on commence à détecter quelques décharges sans atteindre le seuil de 1 décharge/s				
**CNV: cellule non vieillie				

Tableau 14. Tensions caractéristiques des décharges partielles enregistrées sur des cellules sans défaut vieilles

Comparativement à ce qui a été observé avec des cellules non vieilles, la TADP est relevée de 40 % , passant ainsi de 5,6 kV_{eff} à 7,8 kV_{eff} en moyenne. De plus, les décharges partielles du premier régime ont des fréquences moins élevées que celles mesurées dans des cellules non vieilles.

Les premières décharges sont très peu nombreuses et de faible amplitude (0,1 à 0,2 pC) (figure 29). Le claquage qui se produit à une tension très peu supérieure à la TADP est précédé par l'apparition d'un second type de décharges plus intenses et plus nombreuses. Le seuil de transition vers ce second régime est relevé d'environ 6 % dans la cellule vieillie, passant ainsi de 7,5 kV_{eff} à 7,9 kV_{eff} en moyenne. Mais l'écart entre la tension de transition et la tension de claquage qui est de 5 % avec une cellule non vieillie devient quasiment nul avec une cellule vieillie (Tableau 14).

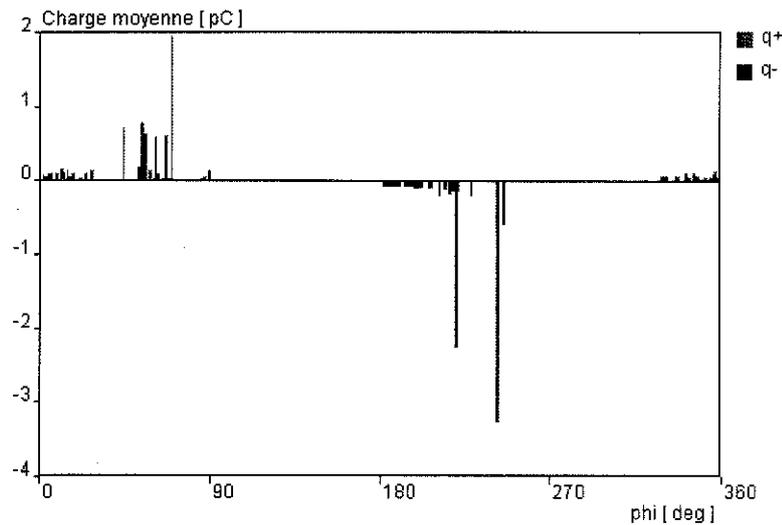


Figure 29. Distribution $Q_{moy}(\Phi)$ à tension constante $V=7,9 \text{ kV}_{eff}$ (1^{er} régime).

III. 2. b. Cellule vierge sans défaut imprégnée de liquide vieilli :

Nous avons voulu connaître l'impact du vieillissement du liquide d'imprégnation sur les décharges. La cellule d'étude comportant deux films de PP neufs, a été imprégnée de Jarylec récupéré dans des cellules vieilles.

La résistivité du liquide après vieillissement a baissé d'un facteur 300 passant ainsi de $7.10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ à $2,25.10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ (nos propres mesures).

Les résultats sont présentés ci dessous :

Tout d'abord on remarque (tableau 15) que les tensions caractéristiques sont comparables à celles obtenues avec une cellule vieillie avec cependant des tensions de transition et de claquage plus élevées.

	TADP*	TADP f>1Hz	Tension de transition	Tension de claquage
Expérience 1	6800	8600	8900	8900
Expérience 2	6100	7500	8200	8200
Expérience 3	6500	7800	8000	8000
Expérience 4	6600	7900	8300	8400
Moyenne	6500	7950	8350	8400
écart avec CNV**		+40 %	+12 %	+5 %
*tension à partir de laquelle on commence à détecter des décharges sans atteindre 1 décharge/s				
**CNV: cellule non vieillie				

Tableau 15. Moyenne des tensions caractéristiques des décharges sur 4 expériences avec des cellules à films neufs imprégnés de liquide vieilli.

Lors d'une acquisition à une tension correspondant au 1^{er} régime, on ne détecte que très peu de décharges comme pour une cellule vieillie, ce qui ne nous permet pas de calculer

les paramètres statistiques.

Pour les décharges du 2^{ème} régime, les distributions sont comparables à celles obtenues avec une cellule non vieillie. Il n'est donc pas utile d'en donner des exemples.

La figure 30 illustre l'augmentation brutale de la charge qui ne se produit que juste avant le claquage. Les premières décharges (de $t=300$ à $t=455$ s) correspondent au 1^{er} régime. La rafale qui suit est composée de décharges du 2^{ème} régime.

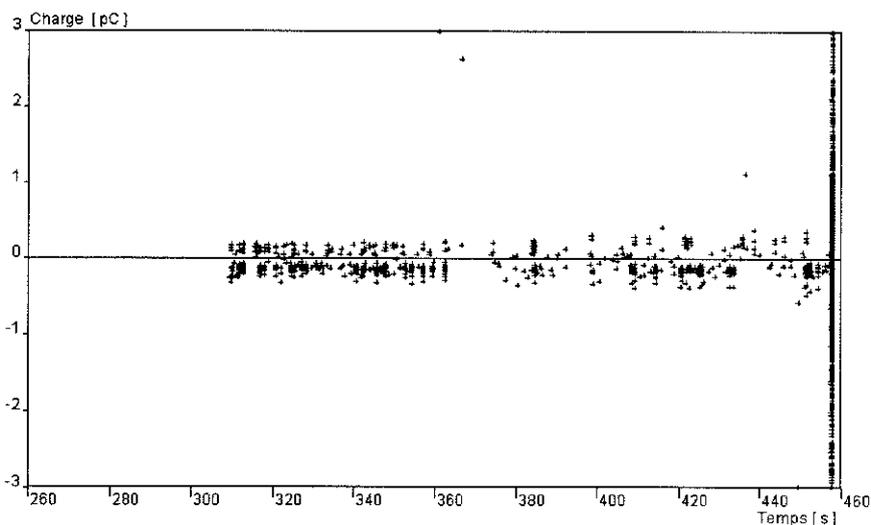


Figure 30. Evolution avec le temps de la charge apparente des décharges, $V=\text{constante}=8,9 \text{ kV}_{\text{eff}}$

Les courbes 31 et 32 illustrent l'évolution de la fréquence moyenne des décharges et de leur charge moyenne en fonction de la tension appliquée.

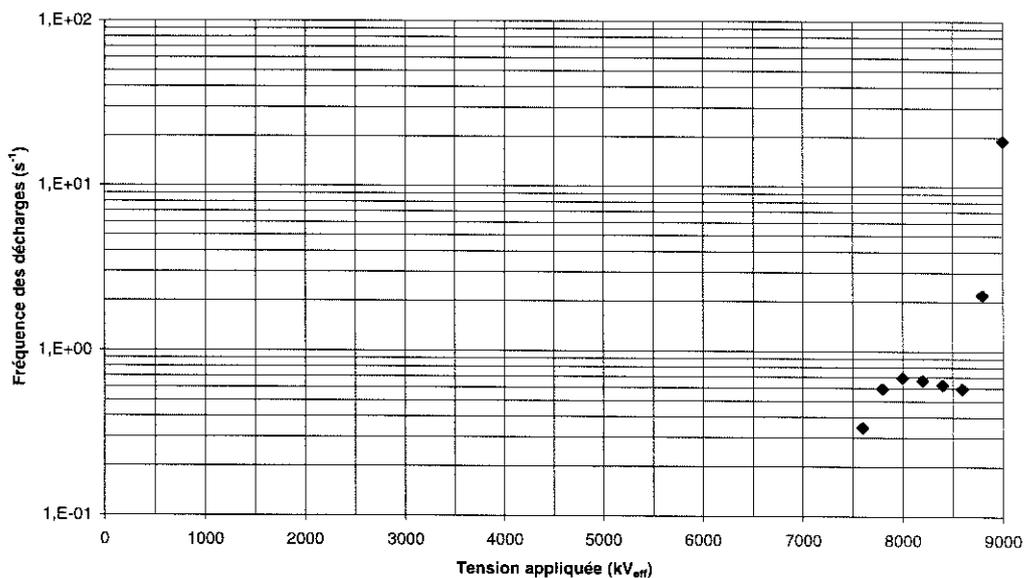


Figure 31. Evolution de la fréquence des décharges dans une cellule imprégnée de liquide vieillie

Les fréquences des décharges sont extrêmement faibles (par exemple 2,2 décharges par seconde à $V=8800 V_{\text{eff}}$) (figure 31), de même, les charges sont très faibles (figure 32).

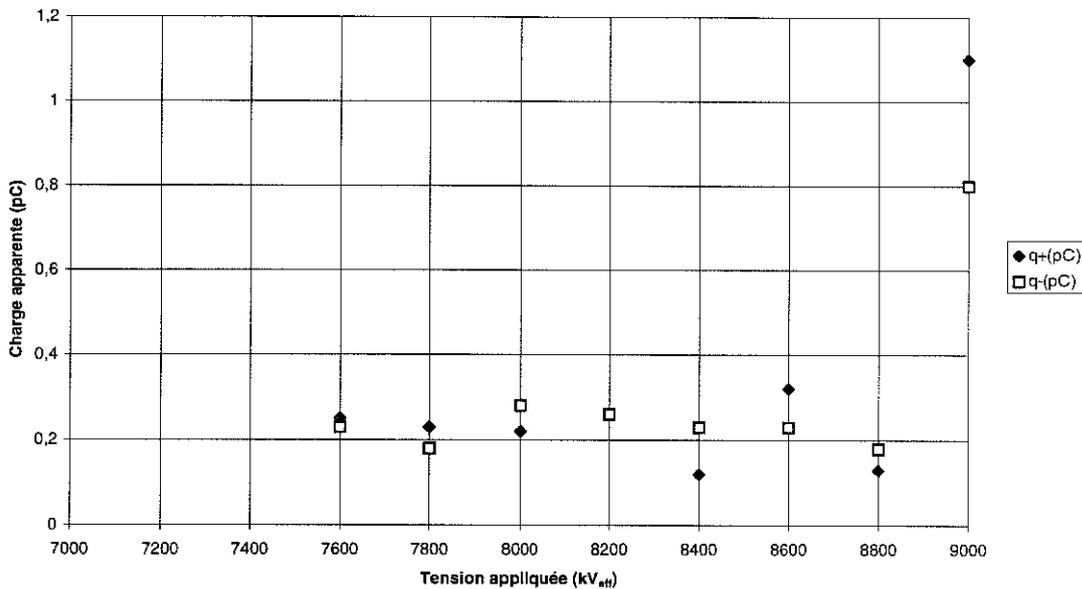


Figure 32. Evolution de la charge apparente des décharges (moyenne) en fonction de la tension appliquée

III. 3. Conclusion :

L'étude du vieillissement d'un modèle de condensateur sans défaut à structure symétrique montre une élévation de la TADP ainsi qu'une diminution très nette de la fréquence des décharges et de leurs charges apparentes. Comme dans le cas d'une cellule non vieillie, on note la présence de 2 régimes de décharges, même si le 2^{ème} régime conduit très rapidement au claquage. Parfois, on obtient le claquage avant même d'avoir observé des décharges du second régime. Le vieillissement abaisse la résistivité du liquide imprégnant d'un facteur 300. Cette diminution se traduit par un courant de conduction plus fort et par conséquent des pertes plus élevées. La résistivité intervient également dans le temps de relaxation de la charge qui se dépose sur le film imprégné et qui modifie le champ électrique près du bord d'armature [Tak76]. Lorsque la résistivité baisse, le temps de relaxation baisse d'autant. Il est donc nécessaire d'augmenter la tension pour atteindre les conditions de champs nécessaires à l'apparition des décharges partielles.

CHAPITRE IV

DECHARGES PARTIELLES PROVOQUEES PAR UN DEFAUT DANS LE MODELE DE CONDENSATEUR

valeur limite est atteinte après une heure d'imprégnation. Un temps d'imprégnation de deux heures paraît donc raisonnable.

Nous avons quantifié le défaut d'imprégnation par le rapport r de la capacité de la cellule mesurée après deux heures d'imprégnation à la capacité de la cellule mesurée avant imprégnation, $r = \frac{C(t=2h)}{C_{sec}}$. Ce rapport est constant et égal à $1,07 \pm 0,01$ alors qu'il est d'environ $1,13 \pm 0,2$ pour une cellule parfaitement imprégnée sous vide.

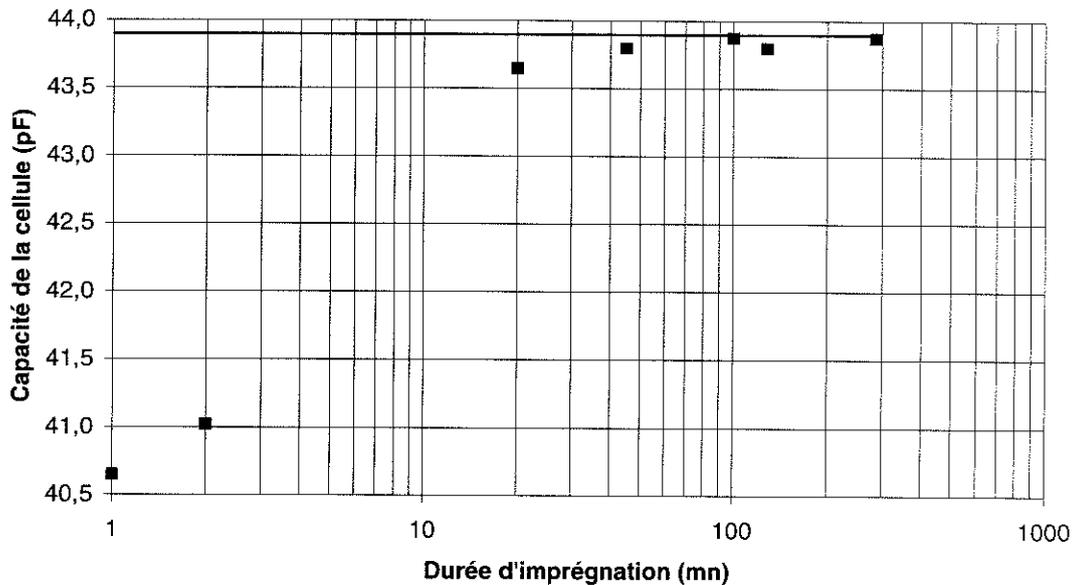


Figure 1. Evolution de la capacité en fonction de la durée d'imprégnation, en trait continu la valeur asymptote.

I. 3. Résultats:

I. 3. a. Tension d'apparition des décharges partielles (TADP):

La tension d'apparition des décharges (TADP) est de $600 \pm 100 V_{eff}$ quelque soit la dimension de la marge. A titre de comparaison, la TADP dans une cellule non imprégnée vaut $550 \pm 50 V_{eff}$ [Ham96].

A cette tension, le champ en bord d'armature est de $407 \pm 70 kV/cm$.

En considérant la tension seuil obtenue en pointe plan dans l'air [Ham95] pour une pointe de rayon de courbure $r_p=10 \mu m$ et une distance inter-électrodes $d=10 mm$ et en calculant le champ électrique seuil à la pointe par l'approximation hyperboloïde-plan [Coe71], on trouve une valeur du champ seuil E_p à la pointe de $310 kV/cm$.

L'écart observé entre ces deux configurations pourrait s'expliquer de la manière suivante :

Rappelons qu'une décharge est amorcée par un électron germe présent dans la bulle où règne un champ électrique suffisant. Cet électron peut provenir soit de l'ionisation naturelle (radioactivité naturelle, rayonnement cosmique), de l'injection à la cathode ou du détachement éventuel à partir d'un ion négatif présent dans l'air à l'intérieur de la bulle. La contribution de l'ionisation naturelle est très faible, soit environ 4 électrons par seconde et par cm^3 à pression atmosphérique d'après [Mor93]. Celle de l'injection par la cathode semble plus plausible. La dispersion sur la TADP proviendrait alors du fait que la probabilité pour qu'un électron injecté arrive à franchir la couche de liquide séparant le bord d'armature de la bulle dépend de l'épaisseur de celle-ci, car le libre parcours moyen d'un électron dans le liquide est d'environ 10 Å [Mey80]. Dans le système pointe-plan dans l'air, l'électron est directement injecté du métal vers le gaz.

I. 3. b. Evolution des décharges partielles :

Le régime de décharges varie beaucoup dans le temps (figure 2) et en fonction de la tension appliquée.

1. Décharges mesurées à l'application de la tension :

Dès que la tension appliquée dépasse la TADP, les premières décharges apparaissent simultanément sur les deux demi-alternances de l'onde de tension avec de fortes amplitudes (de quelques dizaines à plus de 2000 pC suivant le niveau de tension). On peut observer la lumière émise par les décharges sur les bords d'armature.

Le tableau 1 présente les amplitudes moyennes des décharges dans les premiers instants, en fonction de la tension appliquée à la cellule :

Tension (V_{eff})	charge moyenne dans les premiers instants (pC)
1000	50 à 100
2000	100 à 300
4500 à 5400	1000 à plus de 2000

Tableau 1. Ordre de grandeur de la charge des premières décharges en fonction de la tension appliquée

On remarque que plus la tension appliquée est élevée, plus les décharges sont intenses. Dans la gamme de tension 4500-5400 V_{eff} , on mesure des décharges de même amplitude que celle des décharges du 2^{ème} régime dans une cellule sans défaut (chapitre III).

Au cours des premiers instants de mise sous tension, la diminution de la charge et de

l'intensité de la lumière émise est très importante.

De même, la fréquence des décharges, très importante lors des premiers instants d'application de la tension, diminue fortement si la tension est maintenue constante.

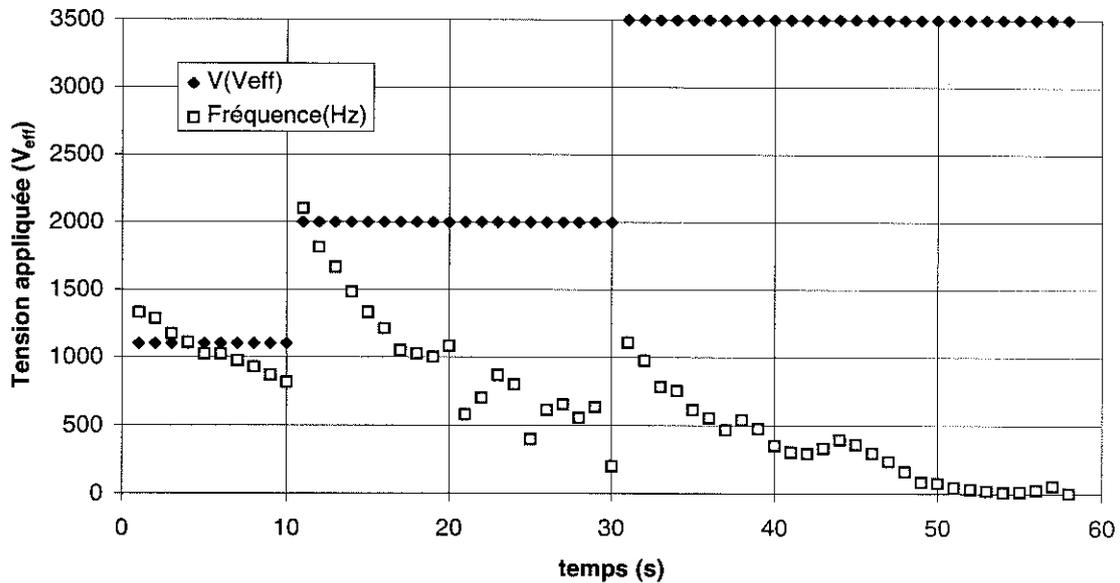


Figure 2. Evolution de la fréquence des décharges lorsque la tension appliquée est maintenue constante

Dans l'essai présenté sur la figure 2, la tension aux bornes de la cellule a été augmentée par paliers : d'abord maintenue constante à 1100 V_{eff} pendant 10 secondes, elle est augmentée à 2000 V_{eff} et maintenue à ce niveau pendant 30 secondes. Enfin, lors du dernier palier dont la durée est de 30 secondes, la tension vaut 3500 V_{eff} . L'unité de fréquence est arbitraire.

On remarque que pour les trois tensions, il y a une décroissance de la fréquence moyenne des décharges partielles en fonction du temps. On remarque également l'effet de la durée de mise sous tension. Ainsi au début du dernier palier, la fréquence est inférieure à ce qu'elle est au début du second palier bien que la tension appliquée à la cellule y soit inférieure.

2. Evolution des décharges en fonction du temps pour la tension nominale :

Les figures 3 et 4 obtenues pour une tension de 2250 V_{eff} (tension nominale) illustrent cette évolution.

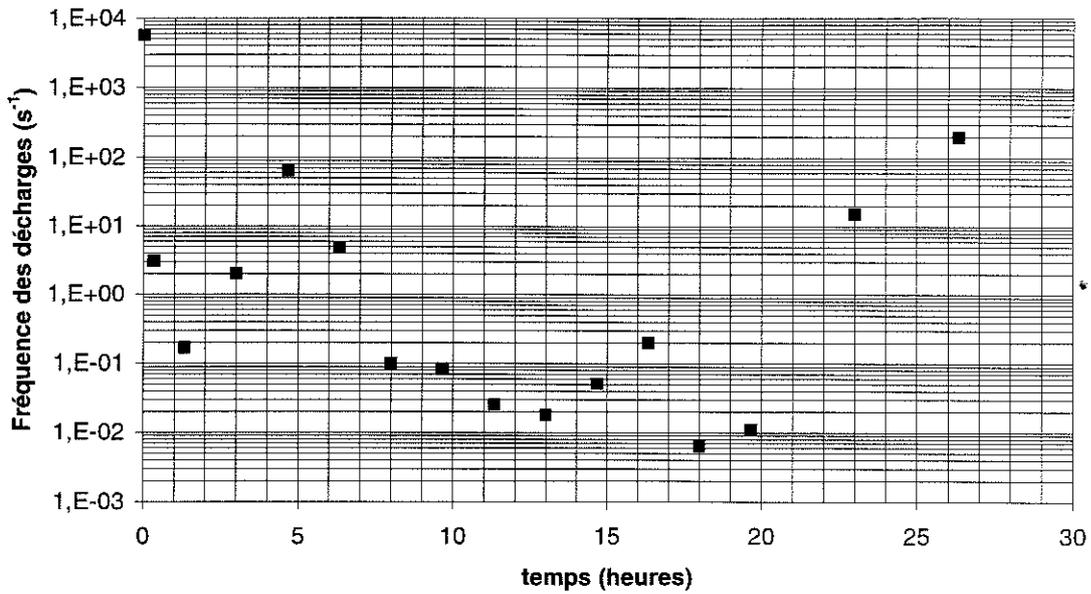


Figure 3. Evolution de la fréquence des décharges en fonction du temps, $V=2250 V_{eff}$

La fréquence moyenne des décharges passe de 5 kHz à $t=0$ à 2 Hz 20 minutes plus tard, soit une baisse d'un facteur 2500. Cette fréquence oscille ensuite tout en continuant à diminuer puis remonte avant la fin de l'expérience soit juste avant le claquage qui survient au bout de 26,5 heures.

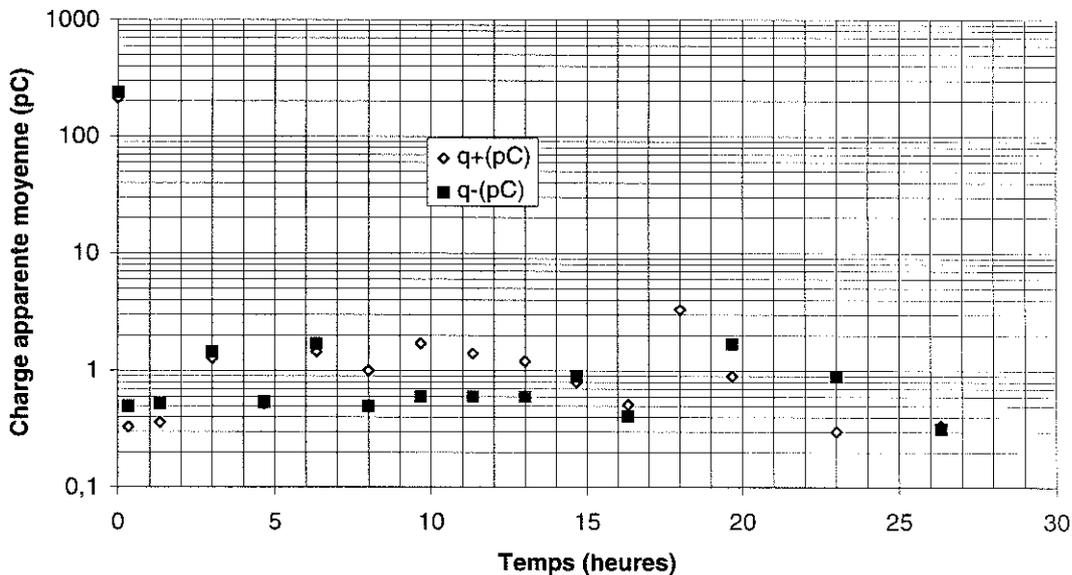


Figure 4. Evolution de la charge apparente moyenne des décharges en fonction du temps, $V=2250 V_{eff}$

La charge diminue fortement également entre $t=0$ et $t=20$ mn (d'un facteur 50), puis reste à un niveau globalement faible. On n'observe pas d'augmentation de l'amplitude des décharges avant le claquage.

3. Evolution des décharges en fonction du temps à différentes tensions :

- Si $V < 3,5 \text{ kV}_{\text{eff}}$: la cellule ne claque pas au bout de 4 heures de mise sous tension (figure 5). Pour des niveaux de tension bas, on constate la disparition totale des décharges, comme pour $V=1000 \text{ V}_{\text{eff}}$ où la cellule a été maintenue sous tension pendant 7 jours mais aucune décharge n'a été détectée au delà de 16 heures de mise sous tension.

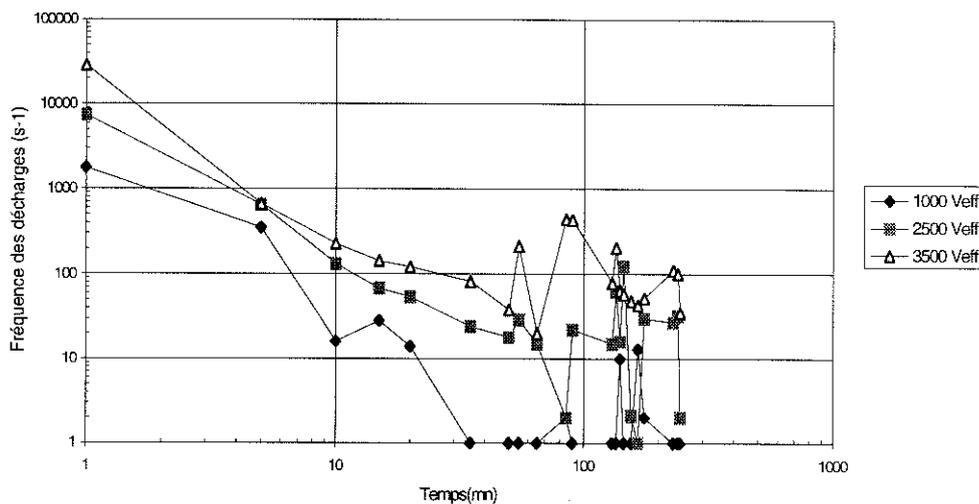


Figure 5. Evolution de la fréquence des décharges en fonction du temps de mise sous tension pour 3 tensions différentes.

On constate, figure 5, que pour un temps donné, la fréquence des décharges est d'autant plus élevée que la tension appliquée est importante. Par ailleurs, pour les 3 tensions, la fréquence tombe à un niveau inférieur à quelques dizaines de Hz en fin de l'expérience.

La charge moyenne baisse fortement lors des premières dizaines de minutes de mise sous tension puis augmente fortement à partir de 100 minutes environ sans que cela ne provoque le claquage dans les 4 heures (figure 6).

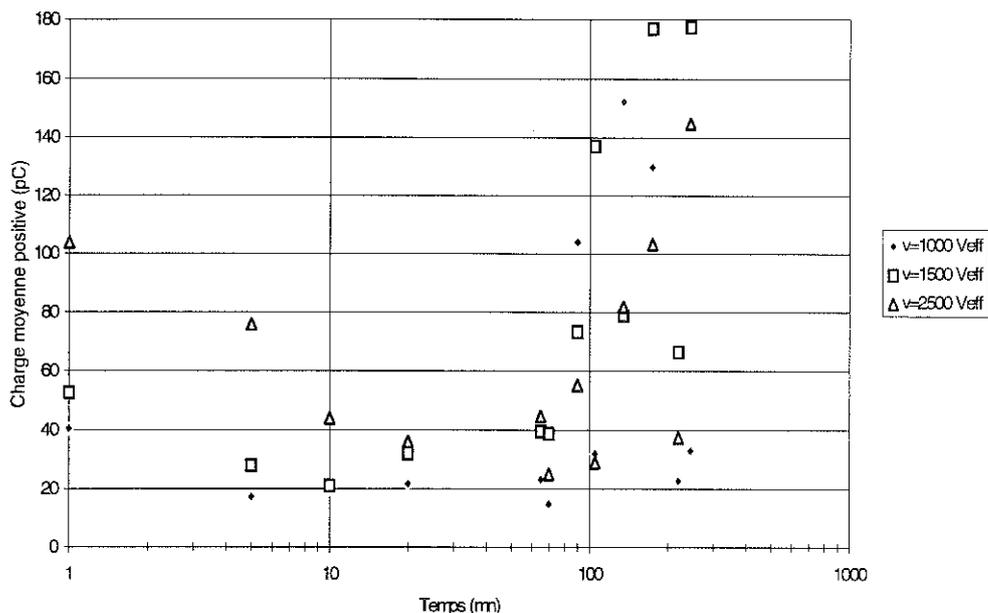


Figure 6. Evolution de la charge moyenne des décharges positives.

- Si $V > 3,5 \text{ kV}_{\text{eff}}$ le phénomène de décharge conduit, au bout d'un temps inférieur à 4 heures, fonction de la tension appliquée, au claquage du condensateur (figure 7).

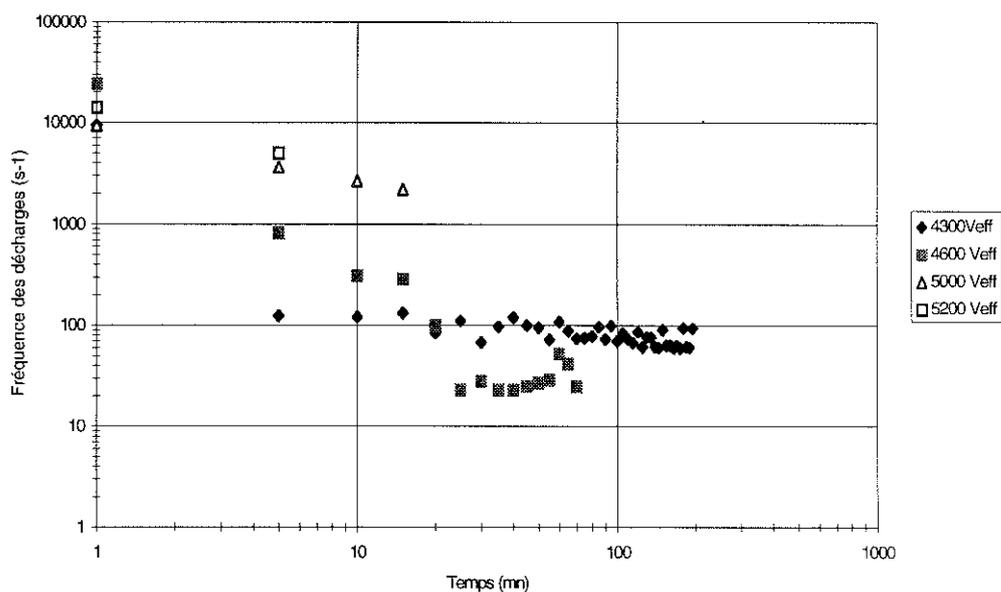


Figure 7. Evolution de la fréquence des décharges jusqu'au claquage en fonction de la durée d'application de la tension.

Pour $V=5 \text{ kV}_{\text{eff}}$, la charge se maintient à un niveau important (supérieur à quelques dizaines de pC). Les charges maximales sont d'environ 1000 pC comme le montre la figure 8. Il y a une évolution brutale de la charge moyenne qui passe de 200 à 800 pC juste avant le

claquage.

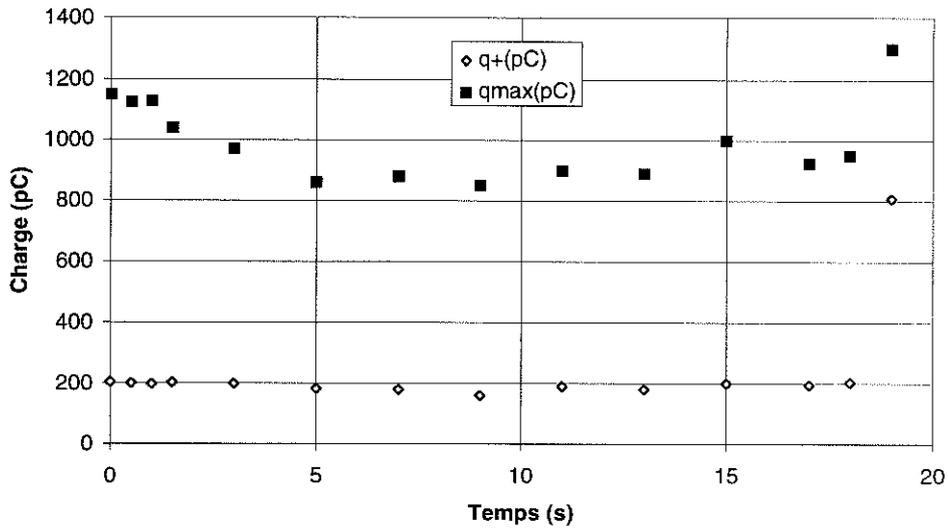
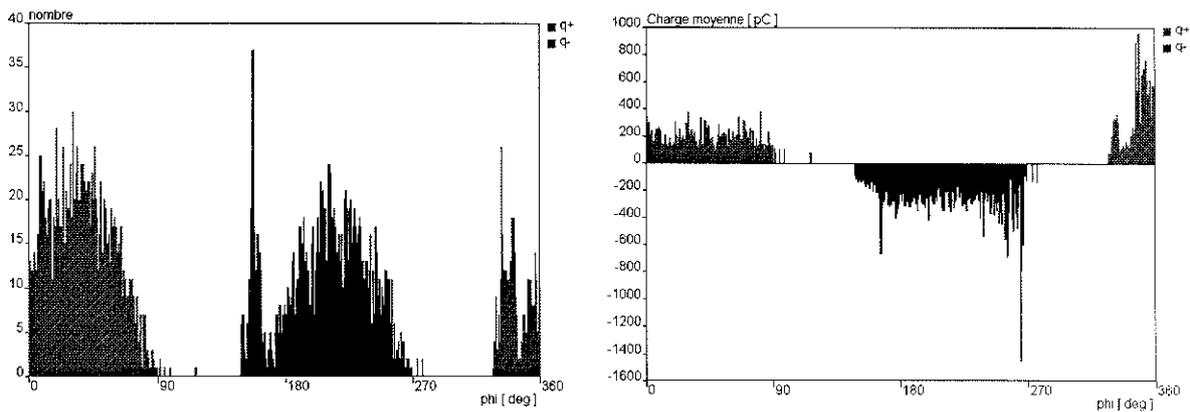


Figure 8. Evolution de la charge au cours du temps pour $V = 5kV_{eff}$.

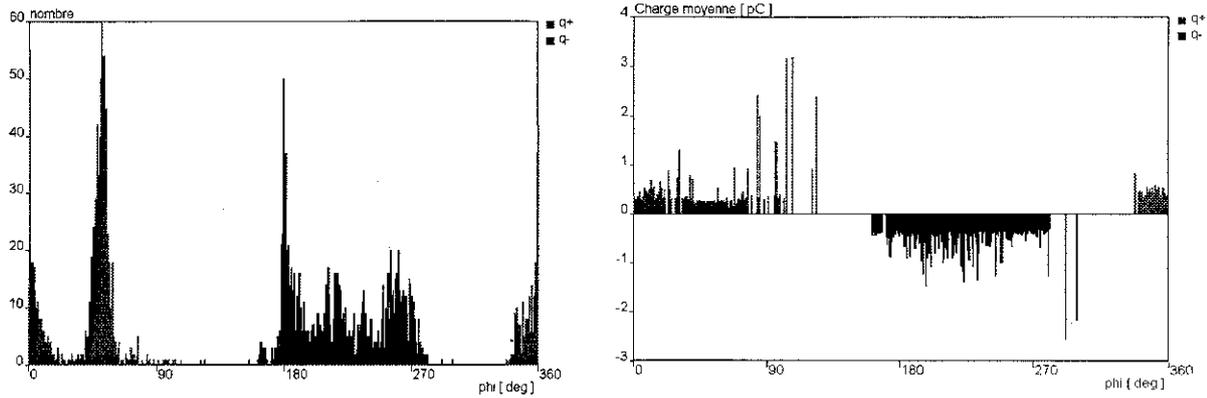
I. 3. c. Distributions des décharges et paramètres statistiques:

1. Distributions des décharges :

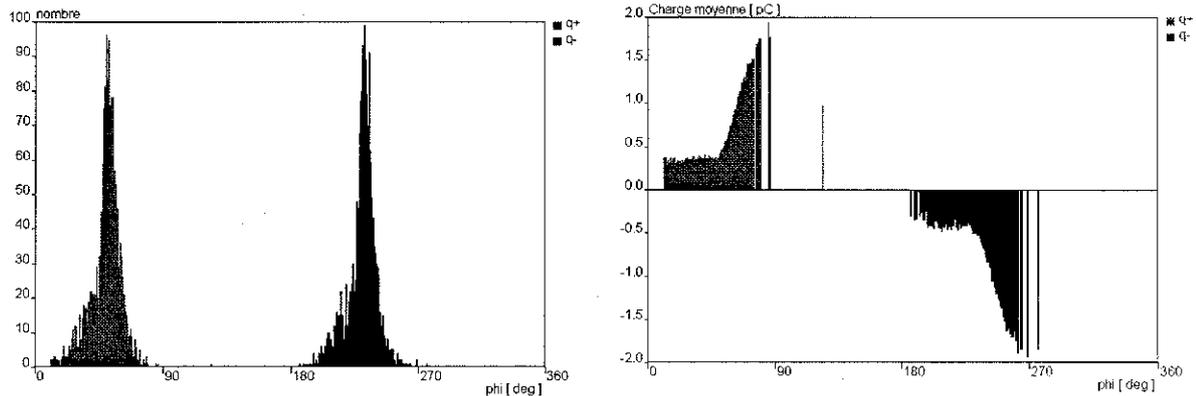
Nous présentons dans ce qui suit les distributions statistiques figures 9 (de a à d) et 10 ainsi que les valeurs des paramètres statistiques obtenus avec $V=2250 V_{eff}$ à différents temps de mise sous tension (tableaux 2 à 4).



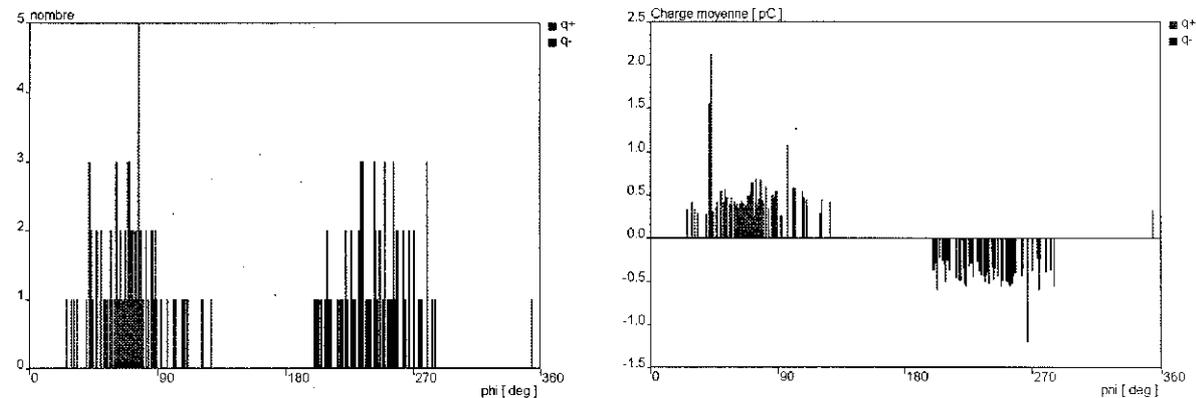
a. distributions $n(\Phi)$ (à gauche) et $Q_{moy}(\Phi)$ (à droite) pour $V=2250 V_{eff}$ à $t=0$



b. distributions $n(\Phi)$ (à gauche) et $Q_{moy}(\Phi)$ (à droite) pour $V=2250 V_{eff}$ à $t=20$ minutes



c. distributions $n(\Phi)$ (à gauche) et $Q_{moy}(\Phi)$ (à droite) pour $V=2250 V_{eff}$ à $t=5$ heures

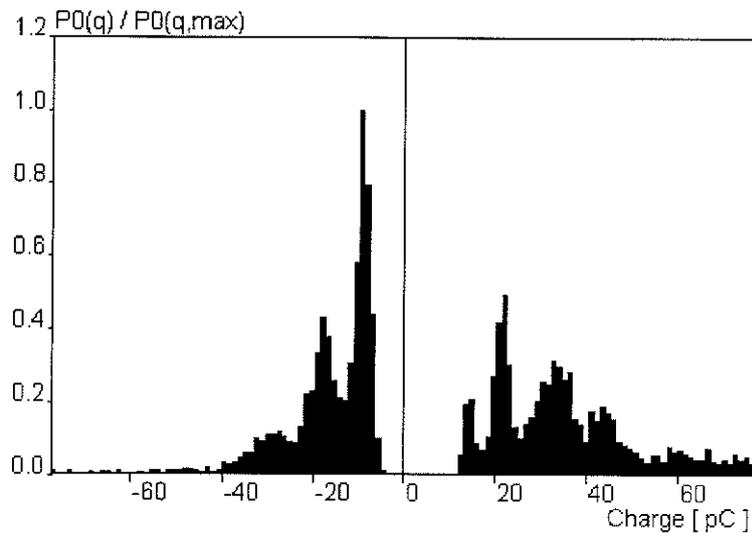


d. distributions $n(\Phi)$ (à gauche) et $Q_{moy}(\Phi)$ (à droite) pour $V=2250 V_{eff}$ à $t=16,6$ heures

Figure 9. Evolution de la forme des distributions $n(\Phi)$ et $Q_{moy}(\Phi)$ en fonction du temps pour $V=2250 V_{eff}$.

Les distributions du nombre et de la charge moyenne en fonction de la phase évoluent en fonction du temps comme le montre l'exemple de la figure 9. Ceci se traduit par une large dispersion des valeurs des moments d'ordre 3 et 4 de ces distributions (Tableau 2). Les autres coefficients statistiques fluctuent également (Tableaux 3 et 4).

La distribution de la probabilité $P_0(Q)$ d'avoir une décharge de valeur Q (figure 11) montre une différence de forme par rapport aux distributions obtenues avec les configurations déjà étudiées. Cette différence est surtout caractérisée par un nombre de pics supérieur à 1 (parfois égal à 5 ou 6) contrairement au cas précédent où il valait 1.

Figure 11. Distribution $P_0(Q)$ pour $V=1000 V_{eff}$

La distribution de décharges positives comporte dans l'exemple de la figure 11, 4 pics distincts et celle des décharges négatives en compte 3.

b. Paramètres statistiques :

t(heures)	sk_n	ku_n	sk_q	ku_q
0	-0,2	-0,7	0,38	-1,12
0,3	-0,3	-1,31	0,2	-1,18
3	-0,43	-0,28	0,3	0,3
5	-0,51	2,4	-0,32	0,35
6,6	-0,2	-0,69	0,45	-0,46
16,6	0,64	-0,55	0,53	-0,3

Tableau 2. Moments d'ordre supérieur pour $V=2250 V_{eff}$

Le changement de forme des distributions se traduit par la fluctuation des moments d'ordre 3 et 4. Ainsi en dehors des deux premières lignes du tableau 2 où les valeurs sont comparables à celles du 2^{ème} régime d'une cellule sans défaut, les autres valeurs sont trop variables pour qu'il soit possible d'en tirer des tendances.

t(heures)	n_+	n_-	EEF
0	2191	1761	0,50
0,3	1623	1416	0,53
1,3	98	90	0,92
3,0	641	1757	0,07
5	1996	2004	0,79

6,6	459	1423	0,65
8,0	51	55	0,76
9,7	32	60	0,73
11,3	10	12	0,74
13,0	15	5	0,72
14,7	36	21	0,86
16,6	98	82	0,83
18,0	3	0	0,73
19,7	6	6	0,75
26,6	1027	2973	0,24

Tableau 3. Nombre de décharges positives et négatives et coefficient EEF en fonction du temps pour 2250 V_{eff}

Le rapport des nombres de décharges positives et négatives évolue également en fonction du temps comme le montre le tableau 3. De même le coefficient EEF et les coefficients de position (tableau 4) montrent une grande dispersion. Les valeurs élevées que l'on obtient parfois pour ces coefficients peuvent être attribuées à la diminution de la taille des bulles au cours du temps, ce qui induit des tensions d'ionisations plus élevées et par conséquent un recentrage des distributions autour des sommets de la sinusoïde.

t(heures)	Pos _n	Pos _q
0	0,15	0,12
0,3	0,17	0,24
3	0,26	0,37
5	0,28	0,33
6,6	0,36	0,32
16,6	0,38	0,38

Tableau 4. Coefficients de position pour $V=2250 V_{eff}$

I. 4. Influence de la marge sur le temps de retard au claquage :

Nous avons mesuré pour deux dimensions de marges (voir annexe 1 pour la définition de la marge) différentes et pour plusieurs niveaux de tensions le temps de retard au claquage. Les résultats sont présentés sur la figure 12.

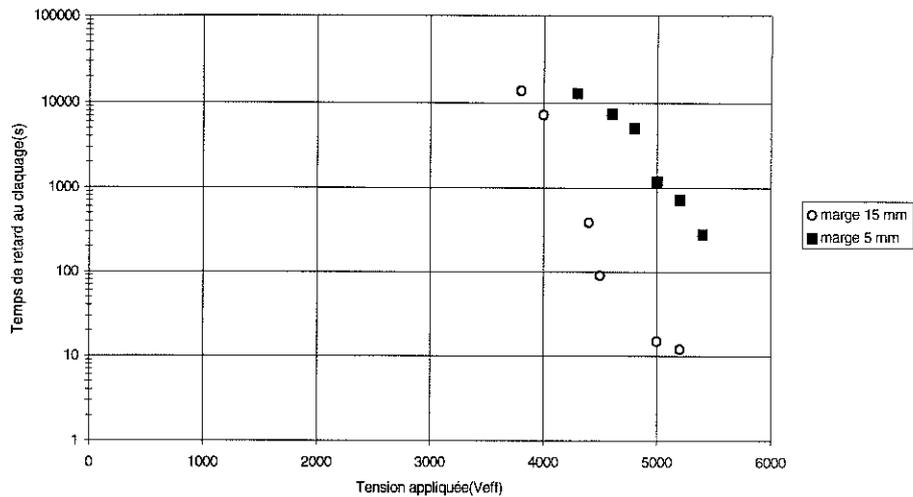


Figure 12. Evolution du temps de retard au claquage en secondes en fonction de la tension appliquée pour deux dimensions de marges différentes.

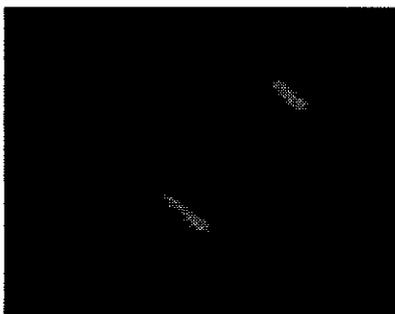
Pour une même tension appliquée, avec une marge plus faible (5 mm), le temps de retard au claquage est plus grand. La différence de comportement en fonction de la dimension de la marge peut s'expliquer par le fait que les bulles, étant repoussées de la zone de champ fort par la force diélectrophorétique [Mey80], arrivent plus facilement à s'échapper lorsque la dimension de la marge est la plus faible.

I. 5. Essais en surtension :

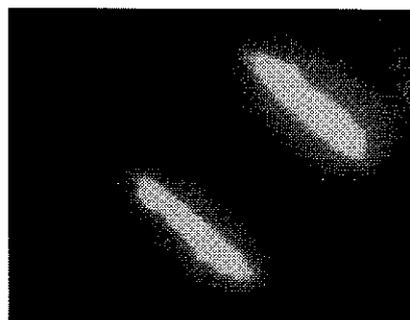
Les surtensions ont été effectuées suivant le standard décrit dans [Fou90]. Une cellule est soumise à 85 surtensions. Entre deux surtensions (5 mn), la tension appliquée est maintenue à 2150 V_{eff}, ce qui correspond à un gradient de 72 V/μm puis lors d'une surtension, la tension est multipliée par 2,25 (soit 4850 V_{eff}) pendant 1 seconde.

I. 5. a. Visualisation :

Les photos obtenues à l'aide d'une caméra CCD en utilisant le dispositif décrit au paragraphe V. 2 du chapitre II et représentant la lumière émise par les décharges lors d'un essai en surtension sont présentées dans l'ordre chronologique dans la figure qui suit.



Avant la première surtension



Lors de la première surtension

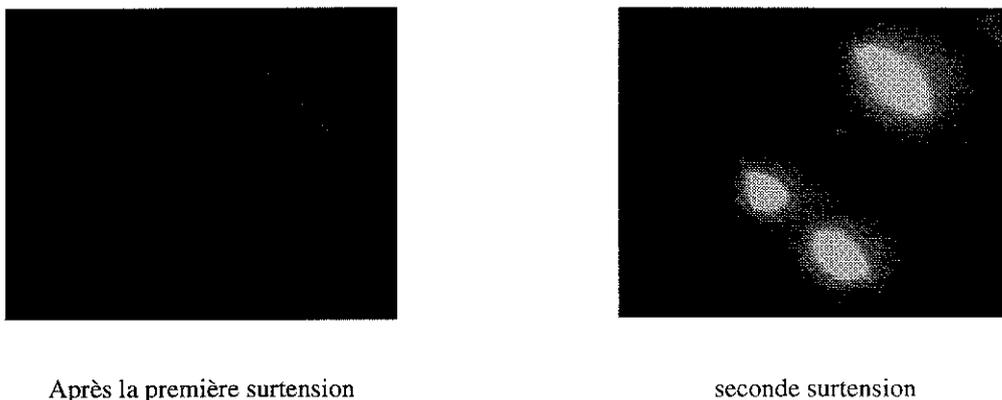


Figure 12 . Observation de la lumière émise par les décharges sur les bords d’armatures lors du test de surtension

On remarque que la lumière émise devient très intense lors de la surtension puis baisse. On constate aussi que la lumière est bien étalée sur les bords lors de la première surtension alors qu’elle se présente sous forme de taches distinctes au cours des surtensions suivantes.

I. 5. b. Evolution de la charge moyenne et de la charge cumulée par cycle :

Lors d’une surtension, la charge augmente brusquement. Les charges maximales mesurées sont alors largement supérieures à celles d’avant surtension (figure 13).

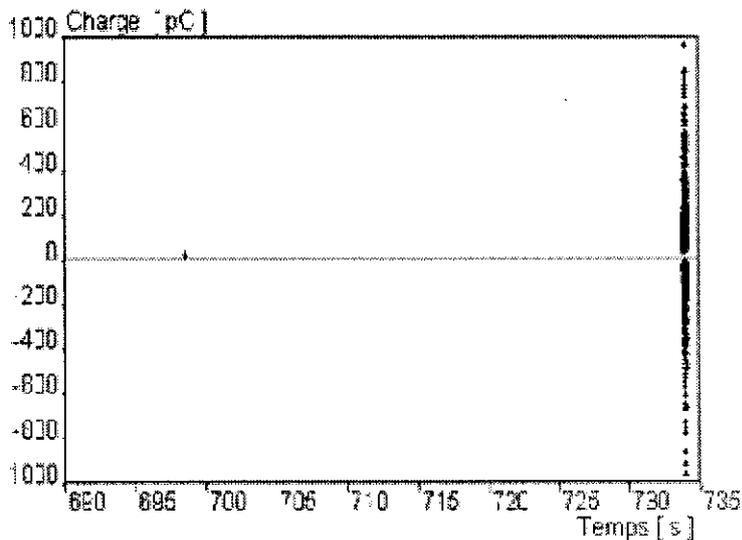


Figure 13. Charge moyenne avant et au début de la 50^{ème} surtension.

Après la dernière période de surtension, la charge diminue fortement (figure 14) et retombe, au bout d’un temps pouvant atteindre quelques minutes, à son niveau d’avant surtension.

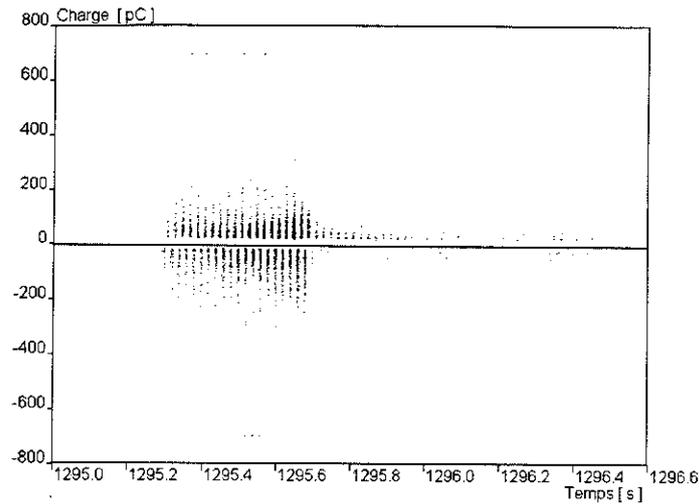


Figure 14. Charge moyenne à la fin de la 50^{ème} surtension.

I. 5. c. Distributions des décharges:

Les allures des distributions $n(\Phi)$ et $Q_{moy}(\Phi)$ des décharges pendant les surtensions sont celles obtenues en régime permanent (tension constante) (figure 10-a du présent chapitre). Il n'est pas utile d'en donner des exemples.

I. 5. d. Evolution d'une surtension à une autre :

D'une surtension à une autre, il y a peu d'évolution de la fréquence ou de la charge moyenne des décharges. Toutefois, les 5 ou 6 premières surtensions donnent lieu à des décharges plus fréquentes (+50%) et plus intenses (+30%) (figures 15 et 16).

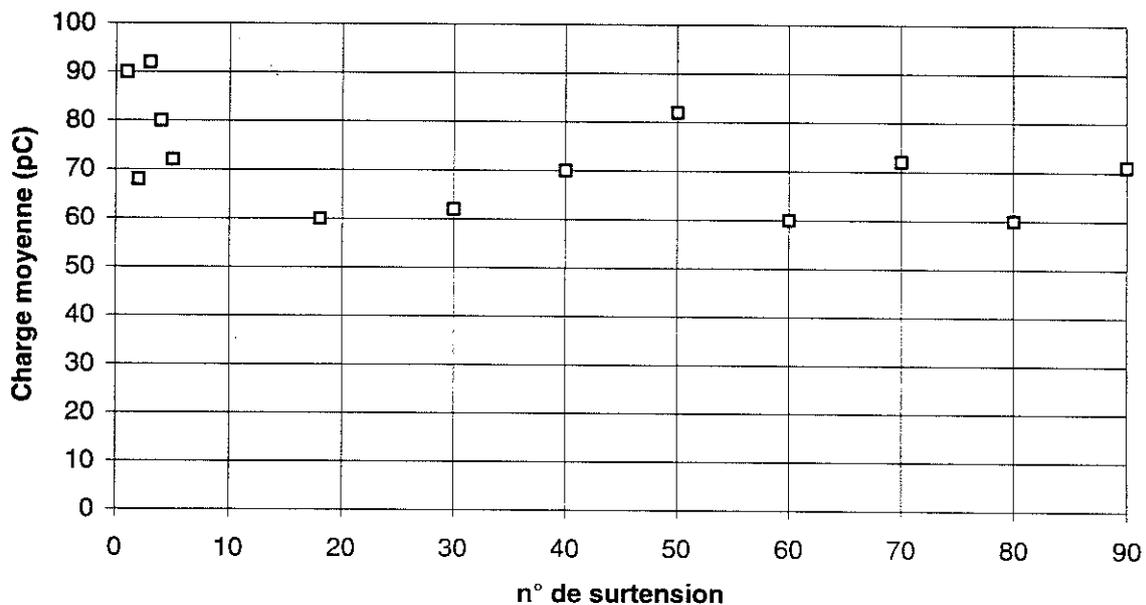


Figure 15. Charge moyenne en surtension en fonction du n° de la surtension.

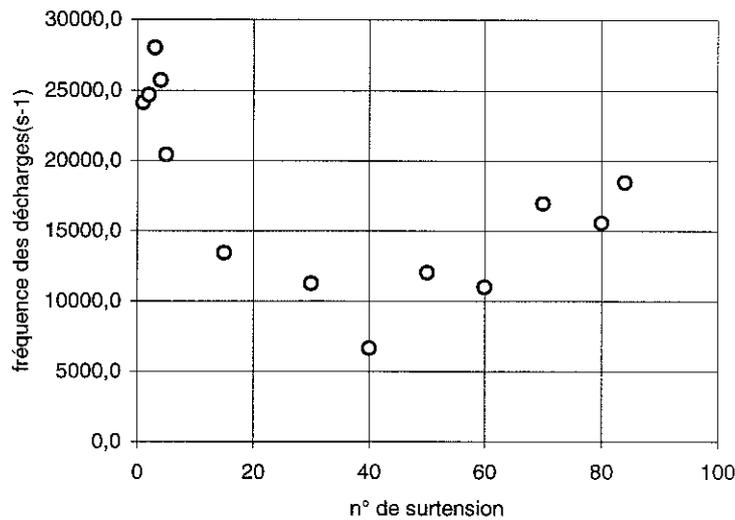


Figure 16. Fréquence des décharges en surtension en fonction du n° de la surtension.

Synthèse des essais en surtension normalisés:

Pour une marge de 15 mm avec une tension appliquée de façon continue de 5000 V_{eff}, le claquage survient au bout de 15 secondes. Pour une tension de 4500 V_{eff}, ce temps est de 90 secondes (figure 12). On peut par interpolation de la courbe de la figure 12, avec une marge de 15 mm, penser que pour V=4850 V_{eff}, soit la tension appliquée lors d'une surtension, le claquage surviendrait après une durée d'environ 40 secondes. Or en considérant les 85 surtensions, la cellule est soumise à V=4850 V_{eff} pendant 85 x 1 seconde soit 85 secondes sans qu'il y ait claquage. Ceci peut signifier que le claquage ne résulte pas d'un processus de détérioration irréversible du film de PP, mais plutôt de l'accumulation de charges ou de gaz pendant la surtension.

Il nous est apparu intéressant de faire des tests de surtension en répartissant autrement les 85 secondes à 4850 V_{eff}. C'est ce que nous appelons ci-après les surtensions spéciales.

I. 5. e. Surtensions spéciales :

Les surtensions décrites dans ce paragraphe sont caractérisées par des intervalles de temps séparant deux surtensions successives (Δt) plus courts que dans le paragraphe précédent (1 mn, puis 10 s au lieu de 5 mn).

1. $\Delta t=1$ minute

Nous avons appliqué 700 surtensions à 4850 V_{eff} pendant 1 seconde toutes les minutes sur une cellule mal imprégnée. Le claquage n'a pas eu lieu.

Evolution de la fréquence et de l'intensité des décharges en fonction du temps :

Les figures 17 et 18 montrent l'évolution en fonction du numéro de la surtension (120 premières surtensions) de l'amplitude et de la fréquence moyenne des décharges lors des surtensions (indice s) et entre les surtensions.

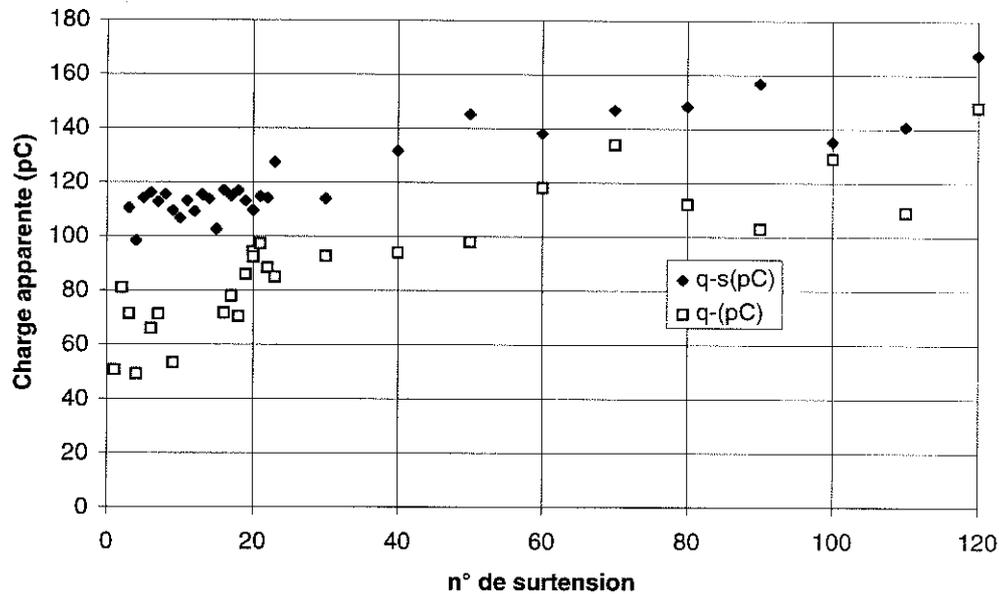


Figure 17. Evolution de la charge apparente des décharges au cours du temps lors des surtensions (indice s) et en dehors des surtensions.

La figure 17 montre une augmentation progressive de la charge négative des décharges en surtensions (+27%) de la surtension 1 jusqu'à la surtension 120. Ceci diffère de ce qui a été obtenu avec le test de surtension classique (paragraphe I. 5. d.), où, en dehors de la diminution constatée aux premières surtensions, la charge reste globalement constante tout au long de l'expérience. De plus, le rapport $\frac{q_s}{q}$ varie entre 1 et 2,5 pour les décharges négatives.

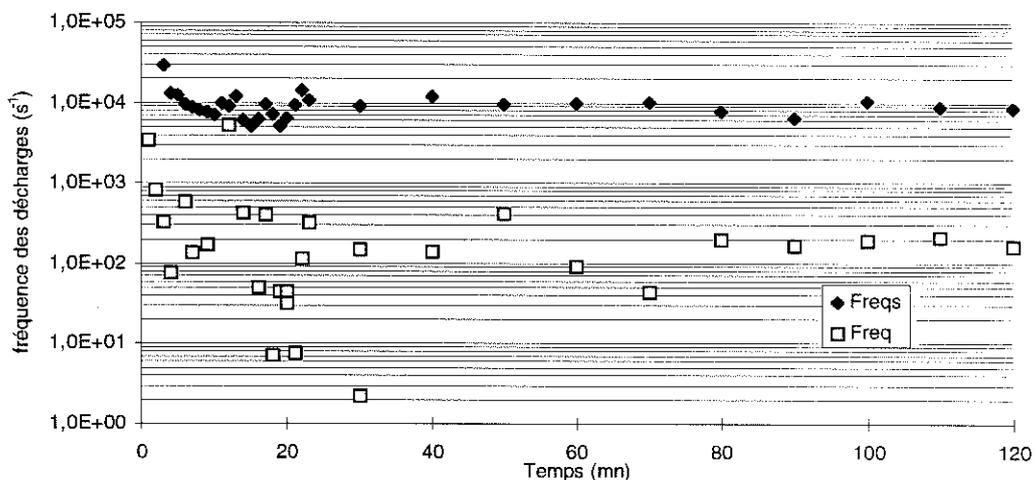


Figure 18. Evolution de la fréquence des décharges au cours du temps lors des surtensions (indice s) et en dehors.

La figure 18 montre une nette diminution de la fréquence des décharges en surtension lors des premières surtensions qui passe de 30 kHz à 5 kHz (soit 1/6 de la valeur initiale) à la 13^{ème} surtension puis se stabilise entre 7 et 12 kHz au delà de la 20^{ème} surtension. La fréquence des décharges pendant les surtensions est en moyenne 50 fois plus élevée qu'en dehors des surtensions. Notons que la valeur correspondant à la première surtension est identique à celle obtenue dans le test de surtension classique (I. 5. d) et qu'au bout de 120 surtensions, soit environ 2 heures, on obtient $f=10$ kHz ce qui est à rapprocher de la valeur obtenue dans le test classique, au bout de la 30^{ème} surtension (soit 2 heures et 30 mn), $f=11$ kHz.

Evolution de la charge apparente après une surtension :

Examinons à présent ce qui se passe après une surtension.

La figure 19 illustre l'atténuation du niveau de décharges après la fin d'une surtension. On voit par exemple que 15 périodes après la fin de la surtension, le niveau de décharges devient insignifiant.

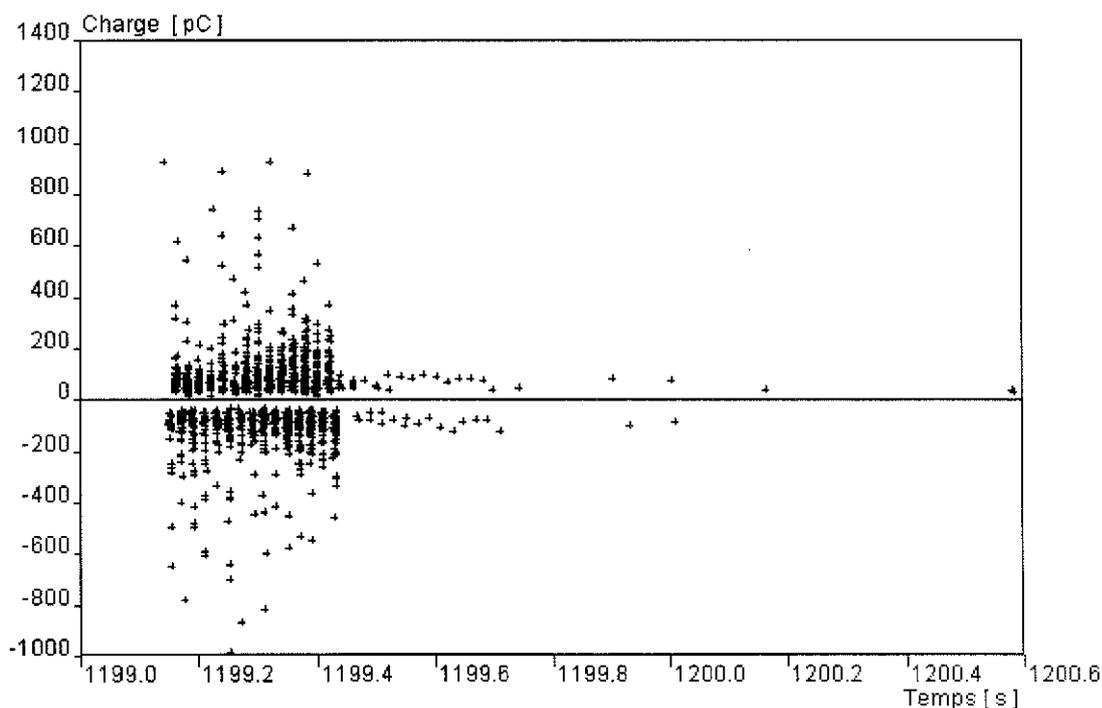


Figure 19. Charge apparente après la 50^{ème} surtension

2. $\Delta t=10$ secondes

Nous avons appliqué 1200 surtensions à 4850 V_{eff} pendant 1 seconde toutes les 10 secondes. Le claquage du condensateur s'est produit au bout de 650 surtensions.

Evolution de la fréquence et de l'intensité des décharges en surtension en fonction du temps :

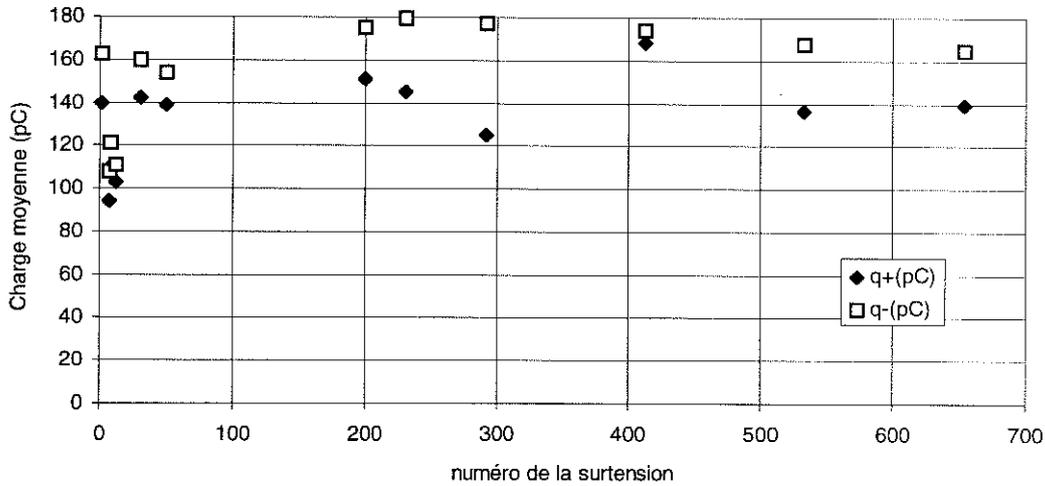


Figure 20. Evolution de la charge apparente au cours du temps en surtension

La figure 20 montre que la charge apparente des décharges positives et négatives se maintient à un niveau important tout le long de l'expérience. La charge moyenne négative est située entre 110 et 180 pC, c'est un niveau similaire à ce qui avait été mesuré pour $\Delta t=1$ minute (100 à 170 pC pour la figure 17).

La fréquence des décharges pendant les surtensions se maintient elle aussi tout le long de l'expérience à un niveau important (figure 21) avec, comme dans la figure 18, une nette diminution au cours des tous premiers instants de mise sous tension.

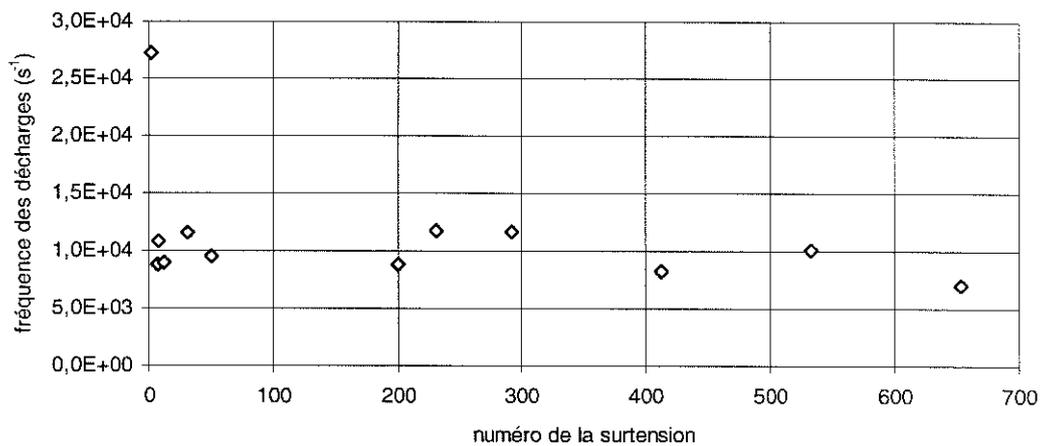


Figure 21. Evolution de la fréquence des décharges en surtension au cours du temps

Evolution de la charge apparente après une surtension :

On remarque figure 22, que les décharges partielles sont très rares dans environ 80% du temps séparant les deux surtensions.

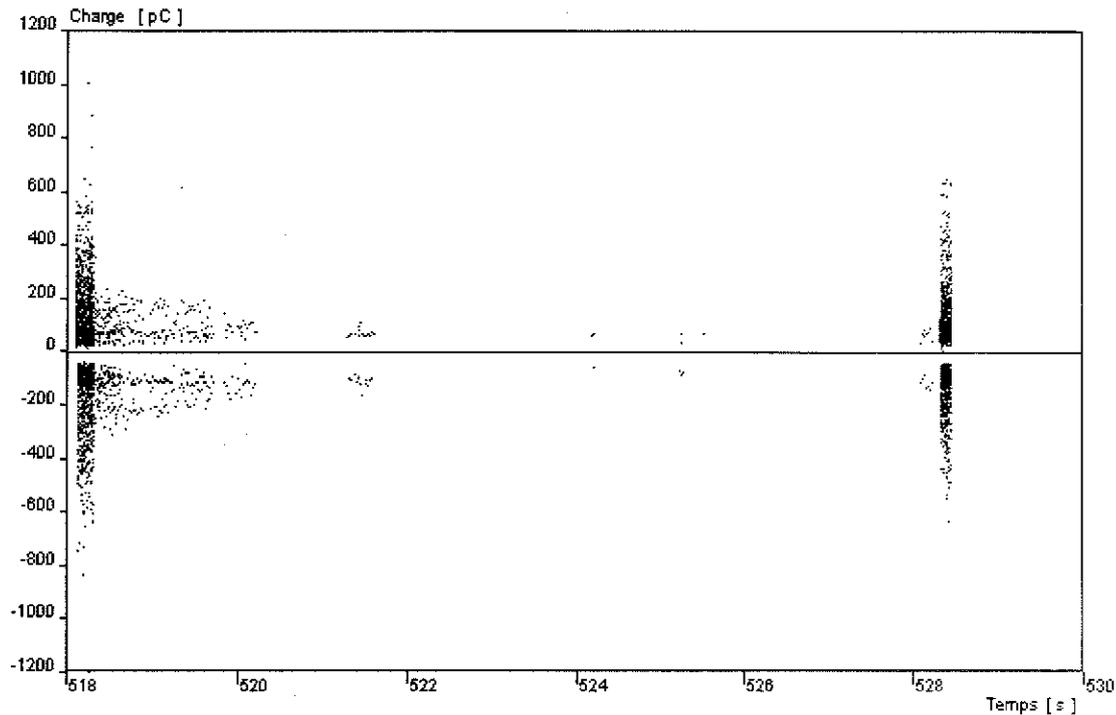


Figure 22. 2 surtensions consécutives (40^{ème} et 41^{ème}).

Synthèse sur les surtensions :

L'écart de temps entre les surtensions Δt est un paramètre déterminant pour le régime de décharge et par conséquent sur l'effet que subit le matériau. Son effet sur les décharges se manifeste par :

- l'augmentation de la charge moyenne des décharges lorsque Δt diminue (figure 23).

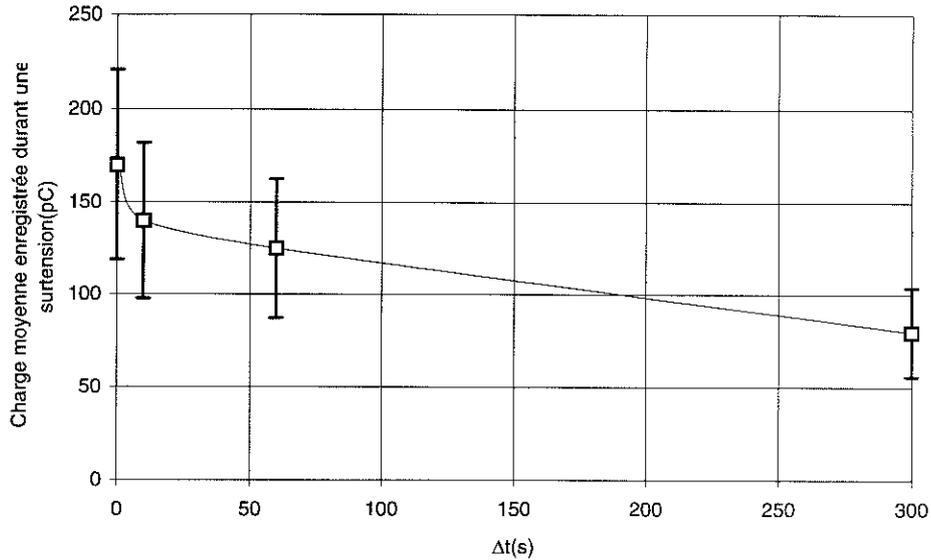


Figure 22. Effet de l'écart entre 2 surtensions sur la charge des décharges en surtension

- L'augmentation du temps de récupération T_r (ie. Le temps nécessaire pour que l'effet d'une surtension ne soit plus détectable) :

$T_r \approx 0,3$ à 1 s pour $\Delta t = 5$ mn et $\Delta t = 1$ mn (figures 14 et 19)

$T_r \approx 2$ s pour $\Delta t = 10$ s (figure 22)

Cet effet sur le régime de décharges se manifeste directement sur le claquage :

- Si $\Delta t = 0$ (soit une application permanente de $V = 4850 V_{eff}$), le claquage survient au bout d'un peu moins de 50 s.
- Si $\Delta t = 10$ s, le claquage survient au bout de 650 surtensions, soit 650 secondes cumulées à $4850 V_{eff}$
- Si $\Delta t = 1$ mn, il n'y a pas eu de claquage même après 700 surtensions.

On envisage alors l'hypothèse suivante pour expliquer ces résultats : plus le temps entre deux surtensions est long plus les bulles créées lors des surtensions vont pouvoir être absorbées ou éloignées des zones de champ fort par diélectrophorèse.

I. 6. Synthèse-conclusion sur le défaut d'imprégnation :

Le caractère erratique des phénomènes observés peut s'expliquer par le comportement des bulles sous champ électrique. Ces bulles vont être le siège de DP et vont se déformer puis se fragmenter [Mey80]. Les microbulles créées vont subir l'effet des forces diélectrophorétiques et être chassées des zones de champ fort. Pour qu'une bulle pressée entre deux films de PP s'échappe définitivement du bord d'armature, il faut qu'elle puisse franchir

une distance égale à la marge, ce qui explique le fait que le temps de retard au claquage soit plus faible lorsque la dimension de la marge est plus importante.

Lorsque la tension est relativement basse, il n'y a pas de génération de gaz, et la quantité de gaz présente dans la cellule va se dissoudre dans le liquide. Puis au fur et à mesure que la tension est augmentée, le nombre de bulles sièges de DP se multiplie (la multiplicité des pics dans la distribution $P_0(q)$ (figure 11) peut être due à ce fait, chaque bulle provoquerait des décharges d'intensité grossièrement proportionnelle à sa taille).

Les décharges enregistrées lors des premiers instants de mise sous tension ressemblent à celles du 2^{ème} régime de décharges dans une cellule sans défaut.

Ce type de défaut est très nocif car il conduit au claquage même à tension nominale. Il peut être reconnu à partir des mesures de décharges partielles, en utilisant la TADP et les paramètres de position dans la phase. Enfin l'évolution très rapide en fonction du temps est également une caractéristique de ce défaut.

II. DEFAUT DE CONTACT

II. 1. Procédure expérimentale :

La méthode que nous avons utilisée pour simuler le défaut de contact consiste à superposer deux morceaux d'aluminium après avoir coupé un des deux rubans utilisés comme armatures dans nos modèles de condensateurs (figure 26). On s'arrange de manière à ce que la partie de l'armature où se situe le défaut soit localisée dans une zone où la pression d'appui est minimale. Ainsi, le mouvement des deux morceaux d'aluminium dû aux forces d'attraction électrostatique est possible. Avant la mise sous tension, une fine couche de liquide sépare les deux bouts de l'armature coupée. Il est extrêmement difficile d'en évaluer l'épaisseur.

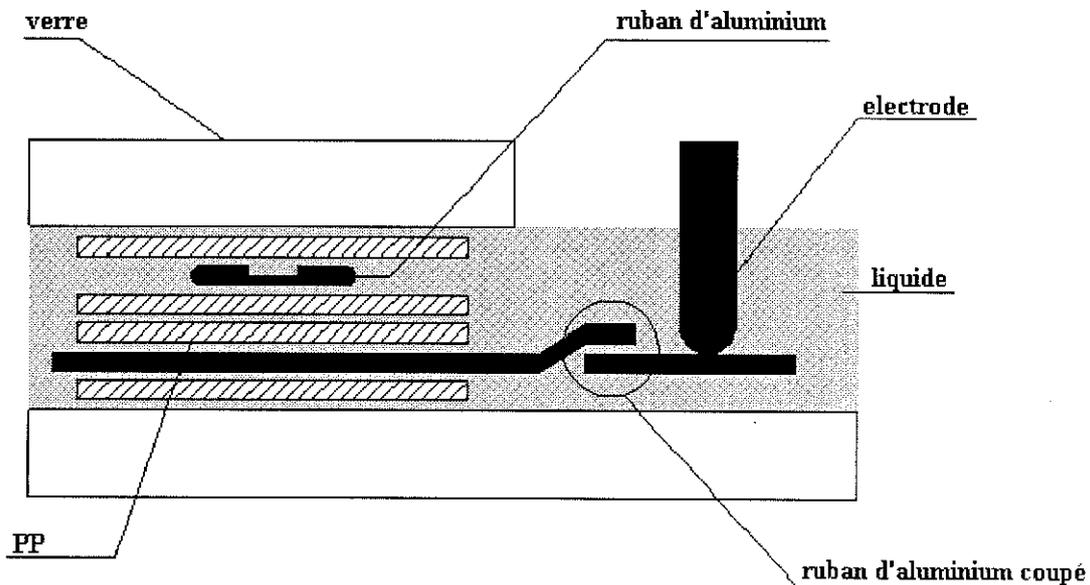


Figure 26. Schéma d'une cellule avec un défaut de contact

On augmente la tension appliquée par palier de 50 V_{eff} et on procède à des acquisitions de décharges partielles à chaque palier. La durée d'une acquisition est de 5 minutes.

II. 2. Résultats expérimentaux :

II. 2. a. Tension d'apparition des décharges partielles:

La TADP est très basse : de 150 à 200 V_{eff} , elle correspond au claquage d'un intervalle de liquide très mince situé entre les deux morceaux d'aluminium de l'armature coupée (intérieur du cercle sur la figure 26). On n'observe aucune lumière sur les bords d'armatures.

II. 2. b. évolution des décharges:

Les décharges sont initialement réparties sur toute la phase de l'onde de tension avec une alternance de décharges positives et négatives sans corrélation avec le signe de la tension.

La fréquence de ces décharges est telle au début de l'application de la tension qu'un grand nombre de décharges intermédiaires sont signalées par notre logiciel, ce qui signifie qu'il y a des pointes de fréquences supérieures à 3 MHz. Puis au bout d'un temps très bref (quelques secondes), les décharges se concentrent principalement au niveau des zéros de tension. Il y a un nombre non négligeable de décharges non mesurées par notre système, car trop rapprochées (tableau 5).

N°	Cycle	Position	Charge [pC]	Tension [V]	Surten.	Dépass.	D.inter.
0	61353	29776	-0.12	80	NON	NON	NON
1	61353	31353	0.25	38	NON	NON	NON
2	61353	31358	-0.34	38	NON	NON	NON
3	61353	33632	0.11	-23	NON	NON	NON
4	61353	33967	0.14	-32	NON	NON	OUI
5	61353	33972	-0.24	-33	NON	NON	NON
6	61353	34728	0.13	-53	NON	NON	NON
7	61353	35251	0.12	-67	NON	NON	NON
8	61353	35534	0.17	-74	NON	NON	NON
9	61353	35542	-0.29	-74	NON	NON	NON
10	61353	36505	-0.12	-99	NON	NON	NON
11	61353	36588	0.09	-101	NON	NON	NON
12	61353	36677	-0.13	-104	NON	NON	NON
13	61353	38172	0.17	-140	NON	NON	OUI
14	61353	38181	-0.23	-140	NON	NON	NON
15	61353	38192	-0.24	-141	NON	NON	NON
16	61353	38938	0.18	-158	NON	NON	NON
17	61353	38957	-0.15	-158	NON	NON	NON
18	61353	38959	-0.16	-158	NON	NON	NON
19	61353	38976	-0.29	-159	NON	NON	NON

Tableau 5. Détail d'un fichier de résultats pour $V=200 V_{eff}$ (les décharges intermédiaires sont signalées)

Lorsque la tension est augmentée, les décharges se concentrent de plus en plus au niveau du passage de la tension par 0 et leur fréquence diminue (figure 27).

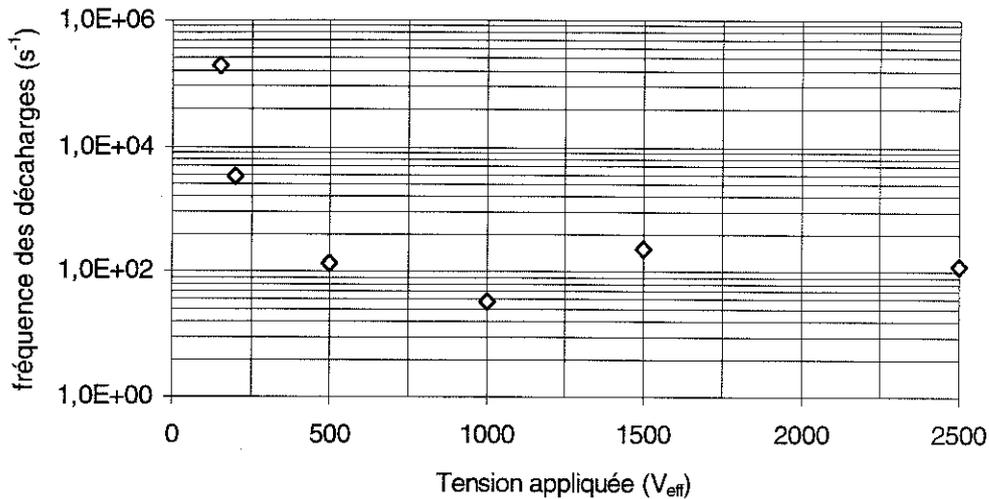


Figure 27. Fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée

Par exemple, la fréquence est divisée par 500 entre $V=150 V_{\text{eff}}$ et $V=2500 V_{\text{eff}}$ (figure 27). Si la tension reste appliquée pendant longtemps, les décharges tendent à disparaître, le seuil d'apparition des décharges est alors sensiblement relevé.

Le tableau 6 donne les ordres de grandeur des charges apparentes en dehors des quelques décharges assez fortes qui disparaissent très rapidement après l'application de la tension.

tension(V _{eff})	q ₊ (pC)	q ₋ (pC)
200	0,17	0,17
500	0,26	0,25
1000	0,37	0,34
1500	0,35	0,34
2500	0,53	0,54

Tableau 6. Charges apparentes des décharges en fonction de la tension appliquée

On remarque que les charges positives et négatives sont quasiment identiques. Globalement la charge augmente avec la tension mais reste inférieure à 1 pC.

II. 2. c. Distributions des décharges :

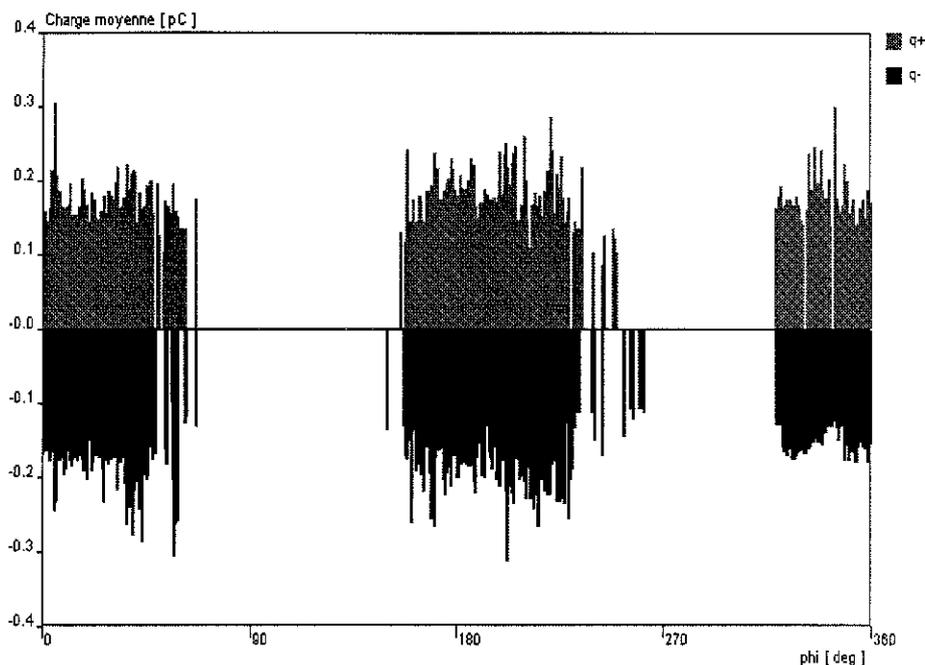


Figure 28. Distribution $Q_{moy}(\Phi)$ pour $V=200 V_{eff}$

Les distributions $Q_{moy}(\Phi)$ et $n(\Phi)$ (figure 28 et 29) sont caractérisées par leur position autour des zéros de tension. Chaque distribution est formée de deux morceaux: l'un est situé autour de 0° et l'autre est autour de 180° . Les spectres + et - ont la même largeur. Il n'y a aucune corrélation entre le signe de la tension ou celui de la pente $\frac{dV}{dt}$ et le signe des décharges, les décharges + et - se succèdent.

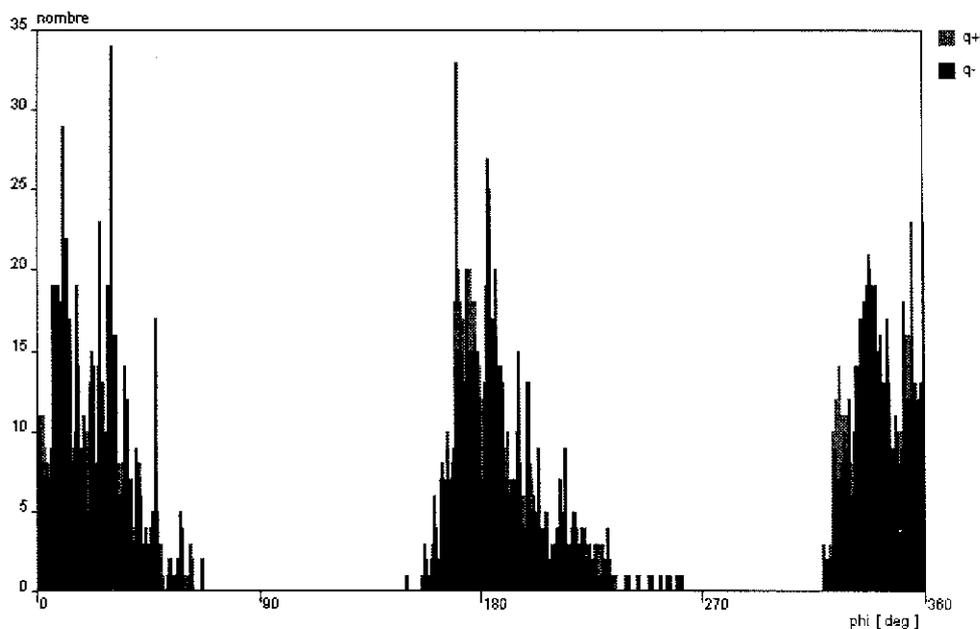


Figure 29. Distribution $n(\Phi)$ pour $V=200 V_{eff}$ (les spectres positif et négatif sont superposés)

II. 2. d. Paramètres statistiques :

Les paramètres statistiques de ces distributions dont certains sont reportés dans le tableau 7, ne sont pas très caractéristiques de ce type de défaut, excepté les coefficients de position. Les distributions étant centrées en zéro, ces derniers sont très proches de zéro ou négatifs, ce qui est très différent de ce que l'on obtient avec les autres types de défauts déjà étudiés.

tension(V_{eff})	Sk_n	Ku_q	Pos_n	Pos_q
200	0,05	-1,16	-0,03	-0,06
500	-0,13	-0,95	0,08	0,03
1000	0,25	-1,04	-0,11	-0,04
1500	0,59	-0,9	-0,21	-0,13
2500	0	-1,07	0,03	-0,01

Tableau 7. Paramètres statistiques des distributions $n(\Phi)$ et $Q_{\text{moy}}(\Phi)$

II. 2. e. Test de surtension:

On fait subir une série de surtensions à une cellule comportant un défaut de contact comme suit: 2000 V_{eff} pendant 30 secondes puis surtension de 5500 V_{eff} pendant 2 secondes.

Les résultats de ce test sont reproductibles et sont reportés sur la figure 30. On note qu'au fur et à mesure que le nombre de surtensions appliquées augmente, les décharges diminuent et disparaissent au bout de la 5^{ème} surtension.

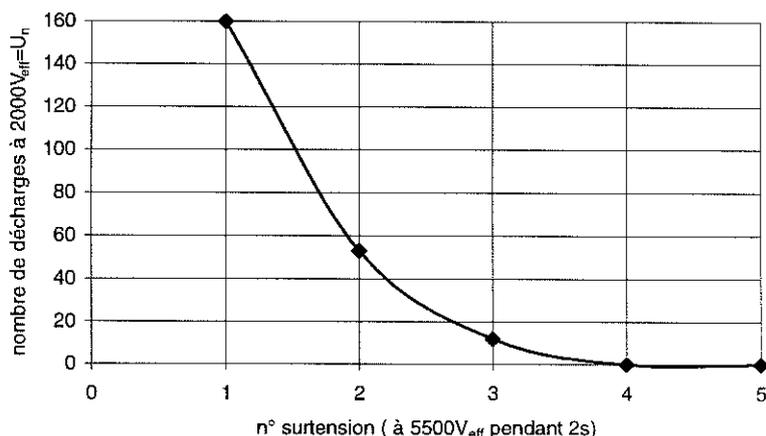


Figure 30. Evolution du défaut de contact par l'application de surtensions

II. 3. Discussion:

Pour tenter de justifier les résultats précédents, nous proposons l'interprétation suivante :

Si la tension instantanée est faible, la force d'attraction électrostatique entre les deux lames d'aluminium est trop faible pour les mettre en contact, il y a alors un intervalle de liquide de très faible épaisseur soumis à un fort gradient électrique, cette couche de liquide est le siège de décharges et claque. Puis il y a carbonisation et les contacts sont soudés.

Lorsque la tension appliquée est relativement élevée, au passage par 0 la tension est trop faible, on est ramené au cas précédent. Lorsque la tension instantanée dépasse une certaine limite, les deux bouts d'aluminium subissent une attraction mutuelle de sorte qu'il restent au contact l'un de l'autre.

En conclusion, ces décharges sont caractérisées par leur faible intensité, la position des distributions autour des zéros de la tension appliquée, la succession de décharges de signes opposés sans corrélation avec le signe de la tension ni avec celui de la pente dV/dt . Les paramètres de position obtenus sont très proches de 0 ou négatifs. En outre, le défaut de contact tel que celui que nous avons réalisé, disparaît suite à l'application d'un régime sévère de surtensions.

III. CAVITE DANS UN FILM DE POLYPROPYLENE

Les cavités étudiées dans cette partie sont percées dans un film de polypropylène et sont de deux tailles différentes : 3 mm de diamètre et 300 μm de diamètre.

Nous nous intéressons à l'apparition des décharges provoquées par ces cavités, à leur évolution en fonction de la tension et en fonction du temps, ainsi qu'à l'allure de leurs distributions statistiques et à leur effet sur le diélectrique.

III. 1. Procédure expérimentale :

Les cavités de 3 mm de diamètre ont été réalisées à l'aide d'un emporte-pièce, celles de 300 μm en perçant un des deux films à l'aide d'une aiguille. Les cavités ont été placées soit sur le bord d'armature soit au centre de la zone de croisement des armatures (figure 31-b). Dans chaque cas, la cavité est placée soit coté haute tension soit coté masse.

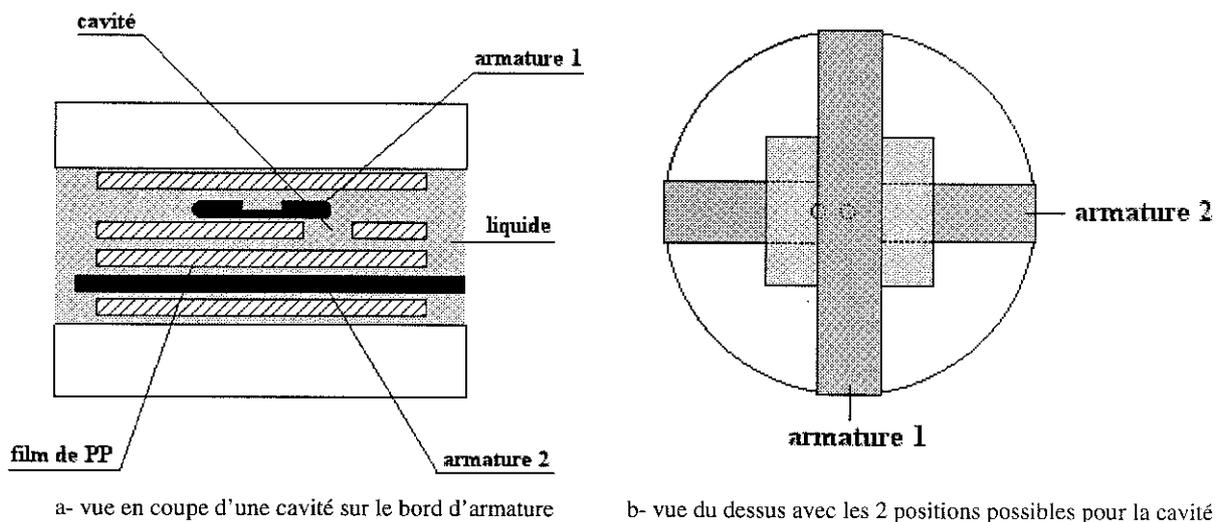


Figure 31. Schéma d'une cellule avec une cavité

Durant chaque essai, la tension est augmentée à un rythme de 100 V/s de $V=0$ à $V=4$ kV_{eff} , puis les acquisitions de décharges sont effectuées toutes les 5 mn en augmentant avant chaque acquisition la tension appliquée de 200 V_{eff} .

III. 2. Résultats avec une cavité de 3 mm de diamètre :

III. 2. a. Tension d'apparition des décharges partielles :

Lorsque la cavité est placée sur un bord d'armature (figure 31-a), la TADP vaut 4,4 kV_{eff} , que la cavité soit côté HT ou côté masse. Cette valeur est en diminution de 21% par

rapport à la valeur obtenue avec une cellule sans défaut. Cette diminution est légèrement plus importante lorsque la cavité est située au milieu du condensateur. Elle atteint dans ce cas près de 24 %, ramenant ainsi la TADP à 4,2 kV_{eff} en moyenne.

Le champ électrique à l'intérieur de la cavité E_c est un champ uniforme. En l'absence de charge d'espace, ce champ peut être calculé simplement à partir de la tension qui règne aux bornes de la cavité qui s'exprime comme suit:

$$V_c = \frac{\epsilon_{pp}}{\epsilon_{pp} + \epsilon_{liq}} V$$

ϵ_{pp} et ϵ_{liq} sont respectivement les permittivités relatives du polypropylène et du jarylec. V est la tension appliquée aux bornes de la cellule. Pour $V=4,4$ kV_{eff}, $V=2$ kV_{eff}=2,8 kV crête.

Soit alors : $E_c=1,88$ MV/cm

III. 2. b. Evolution en fonction de la tension :

Comme dans le cas d'une cellule sans défaut, on note deux régimes de décharges suivant la tension appliquée.

1. Tensions caractéristiques :

Les tensions caractéristiques obtenues avec des cavités de 3 mm de diamètre sont données dans le tableau 8 :

	TADP (V _{eff})	Tension de transition (V _{eff})	Tension de claquage (V _{eff})
CAB HT ou masse	4400 ± 100	5400 ± 200	5600 ± 200
CAM	4200 ± 200	5200 ± 100	5300 ± 200

CAB : cavité située sur le bord d'armature, CAM : cavité située au milieu

Tableau 8. Tensions caractéristiques des décharges en fonction de la position de la cavité

2. Evolution de la fréquence et de l'intensité des décharges en fonction de la tension :

Les figures 32 et 33 représentant l'évolution de la fréquence et de l'intensité des décharges en fonction de la tension permettent de distinguer ces deux régimes.

La fréquence des décharges dans la cavité (figure 32) augmente plus fortement avec la tension que la fréquence des décharges en bord d'armature d'une cellule sans défaut (figure 2, chapitre III).

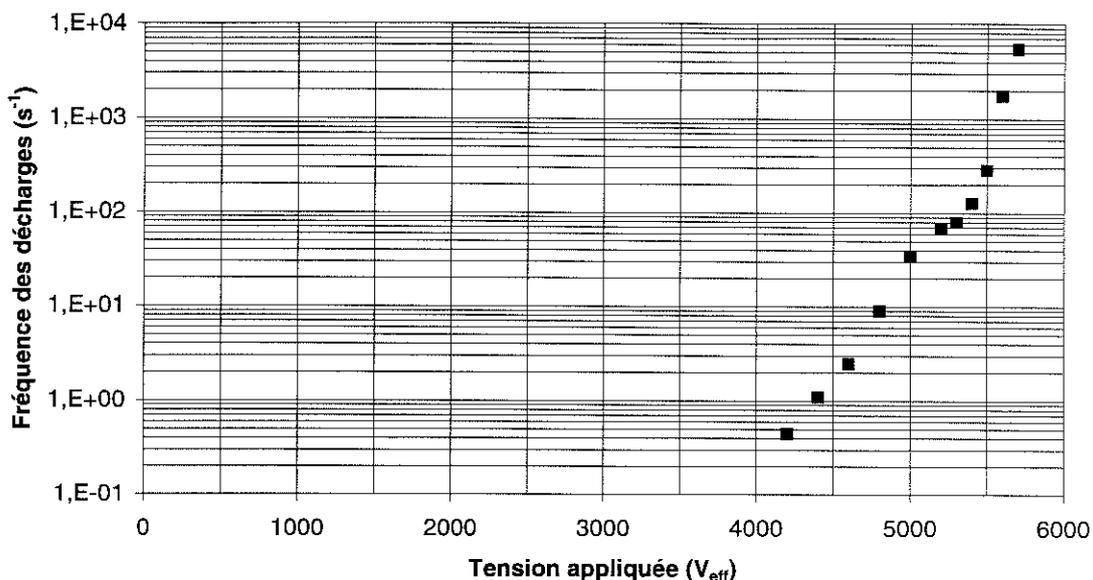


Figure 32. Fréquence des décharges en fonction de la tension, cavité de 3 mm sur bord d'armature, coté HT

De 4,2 à 5,4 kV_{eff}, l'intensité des décharges augmente progressivement avec la tension et passe de 0,5-0,7 pC à 0,9 pC en valeur absolue (figure 33) lorsqu'on s'approche du seuil de transition vers le second régime.

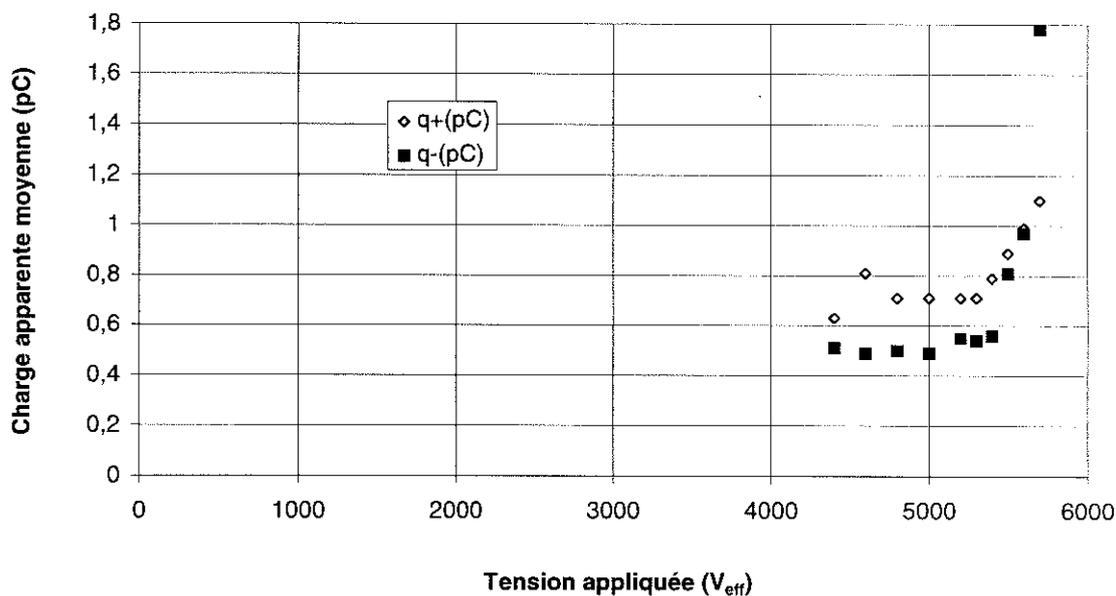


Figure 33. Charge apparente en fonction de la tension, cavité de 3 mm sur bord d'armature, coté HT

a. 1^{er} régime:

Le premier régime est caractérisé par une légère influence de la position de la cavité par rapport à la haute tension ou à la masse. Lorsque la cavité est côté HT, les décharges

négatives sont plus nombreuses que les décharges positives (tableau 9). A l'inverse, lorsque la cavité est coté masse, les décharges positives sont légèrement plus nombreuses.

Notons également que si la tension appliquée est diminuée progressivement lors du premier régime, les décharges partielles disparaissent à une tension égale à la TADP.

b. 2^{ème} régime :

Au delà d'une valeur seuil de la tension, une transition apparaît dans le régime de décharge. Les décharges deviennent nettement plus nombreuses et l'augmentation de la charge en fonction de la tension est nettement accélérée (figure 32 pour la fréquence et figure 33 pour la charge au delà de $V=5,4 \text{ kV}_{\text{eff}}$). Les charges apparentes varient de 1 à 2 pC maximum en valeur absolue. Les fréquences des décharges peuvent atteindre quelques kHz.

Tension (V_{eff})	Côté HT		Côté masse	
	n_+	n_-	n_+	n_-
4800			25	9
4600			76	44
4800	111	508	835	480
5000	680	2090	1863	1236
5200	953	2045	2293	1596
5300			2431	1405
5400	1265	1942	1992	1537
5500	1312	1742	1921	1693
5600	1852	1740		

Tableau 9. Nombre de décharges positives et négatives en fonction de la tension et de la position de la cavité

c. Le claquage :

Le claquage survient assez rapidement. Après avoir démonté la cellule, on observe la présence d'un point noir situé sur le bord de la cavité.

III. 2. c. Distributions des décharges :

Lors du premier régime, la distribution $n(\Phi)$ (figure 34) comprend un pic très aigu à sa gauche et une queue qui s'étend vers la droite, ce qui se traduit par une forte valeur positive du Kurtosis (de 2 à 9) et également une valeur positive du Skewness (1 à 3) (tableau 10).

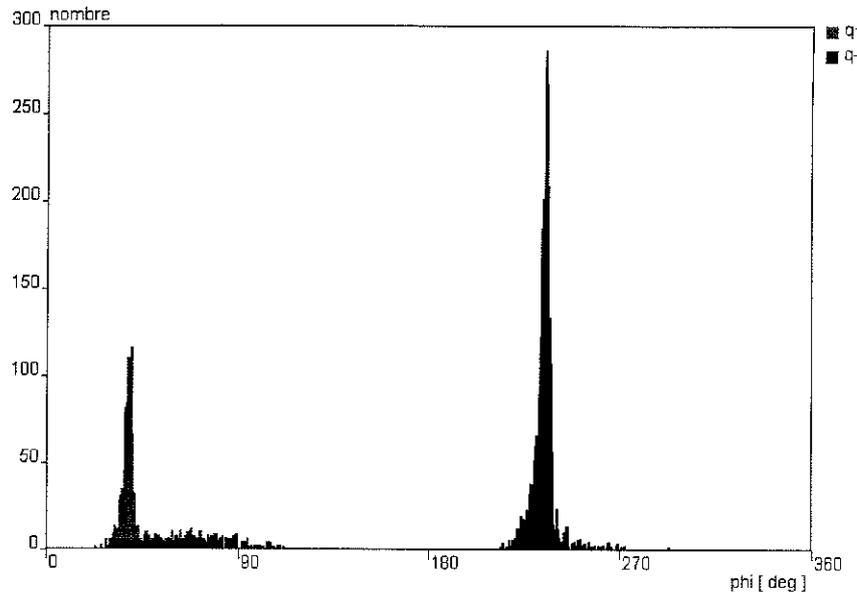


Figure 34. Distribution $n(\Phi)$ pour $V=4800 V_{eff}$ (1^{er} régime)

La distribution $Q_{moy}(\Phi)$ du 1^{er} régime (figure 35) est similaire à celle des décharges du 1^{er} régime en bord d'armature (Annexe 5, figure 5).

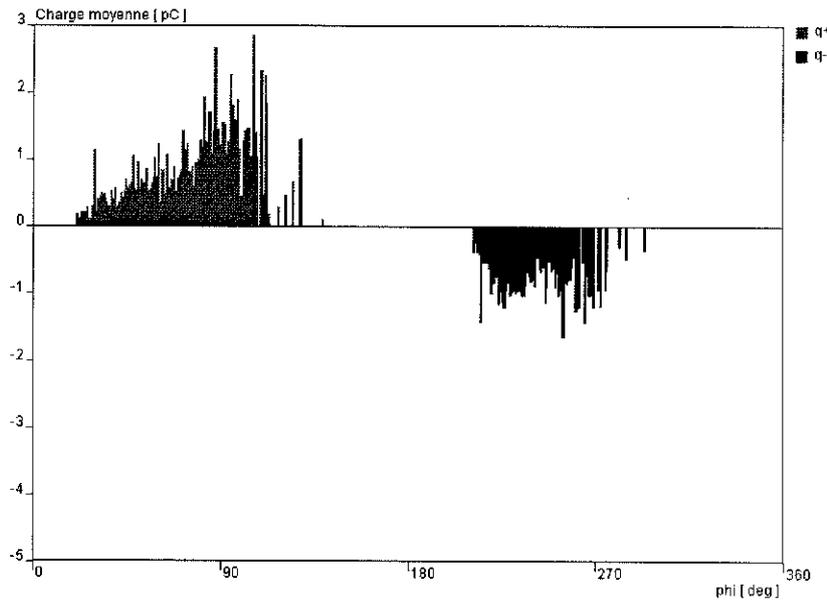


Figure 35. Distribution $Q_{moy}(\Phi)$ pour $V=4800 V_{eff}$ (1^{er} régime)

Lorsqu'on passe du premier régime de décharge au second régime, la distribution $n(\Phi)$ est décalée vers la gauche et son allure devient plus arrondie et symétrique semblable à une distribution gaussienne (figure 36). On retrouve là également des valeurs des moments d'ordre 3 et 4 en bon accord avec la forme des distributions (tableau 10).

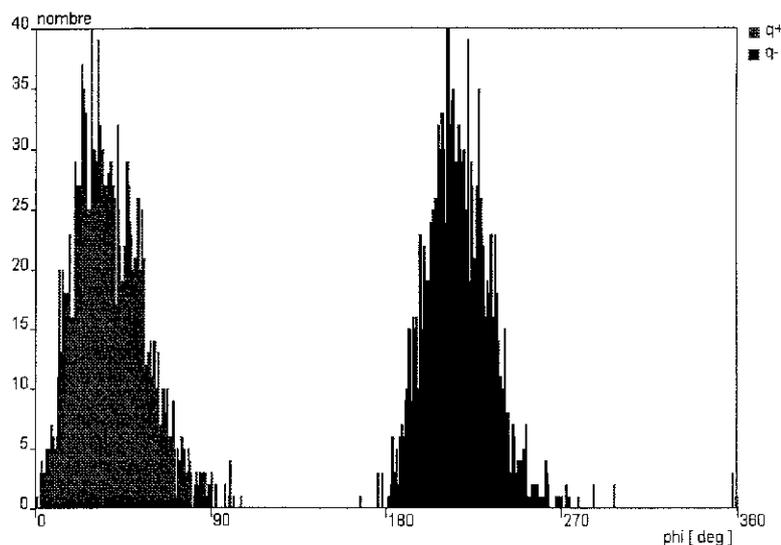


Figure 36. Distribution $n(\Phi)$ pour $V=5600 V_{eff}$ (2^{ème} régime)

Le changement d'allure de la distribution $Q_{moy}(\Phi)$ n'est pas aussi important que pour la distribution $n(\Phi)$.

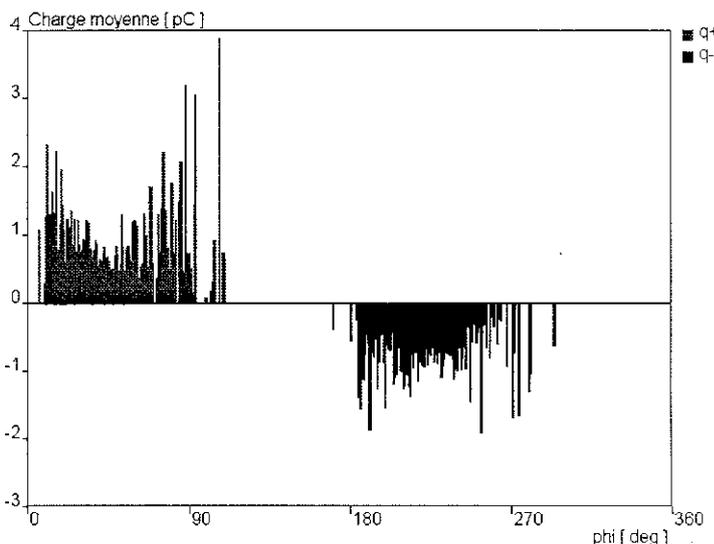


Figure 37. Distribution $Q_{moy}(\Phi)$ pour $V=5600 V_{eff}$.

III. 2. d. Paramètres statistiques :

$V(V_{eff})$	Sk_{n+}	Sk_{n-}	Ku_{n+}	Ku_{n-}	Sk_{q+}	Sk_{q-}	Ku_{q+}	Ku_{q-}	Pos_{n+}	Pos_{n-}	Pos_{q+}	Pos_{q-}
4700	2,42	1,56	8,7	9,1	0,41	0,56	-0,98	-0,72	0,24	0,25	0,28	0,29
4800	1,9	1,9	4	7	-0,1	0,27	-1,15	-0,9	0,24	0,26	0,34	0,30
5000	1,72	1,68	2,66	5,34	-0,15	0,2	-0,96	-0,97	0,25	0,26	0,34	0,33
5200	1,77	1,53	4,03	5,19	-0,26	0,21	-1,12	-1,1	0,24	0,26	0,34	0,31
5400	0,31	0,37	-0,2	-0,04	-0,06	-0,14	-0,94	-0,92	0,19	0,18	0,23	0,24

Tableau 10. Moments d'ordre 3 et 4 et coefficients de position

Les valeurs du Skewness pour les distributions $n(\Phi)$ se situent pour le 1^{er} régime entre 1,5 et 2,5 ce qui indique une dissymétrie vers la gauche. La présence d'un pic aigu dans ces distributions induit une forte valeur du Kurtosis. Concernant les distributions du 2^{eme} régime, celles-ci gardent une légère dissymétrie vers la gauche mais ont une forme arrondie. Le Kurtosis de $Q_{moy}(\Phi)$ indique une distribution relativement plate.

Les coefficients de position diminuent lors du passage du 1^{er} au 2^{eme} régime de décharges car il y a un déplacement vers la gauche des distributions correspondantes. Aussi, les valeurs du 1^{er} régime sont comprises entre celles du défaut d'imprégnation (premières minutes de mise sous tension) et celles d'une cellule sans défaut.

III. 2. e. Evolution en fonction du temps :

La figure 38 représente l'évolution de la fréquence des décharges en fonction du temps d'application de la tension et pour 5 tensions différentes. Dans le cas $V=4400 V_{eff}$, on remarque que la fréquence est fortement atténuée au bout de 350 mn. Pour les autres valeurs de la tension appliquée, le claquage survient au bout d'un temps inférieur à 350 mn. Pour chaque tension, le dernier point de la courbe est celui qui précède immédiatement le claquage.

Remarque: pour $V=5,4 kV_{eff}$, nous avons reporté un seul point correspondant à $t=0$ car le claquage est survenu avant 5 mn de mise sous tension.

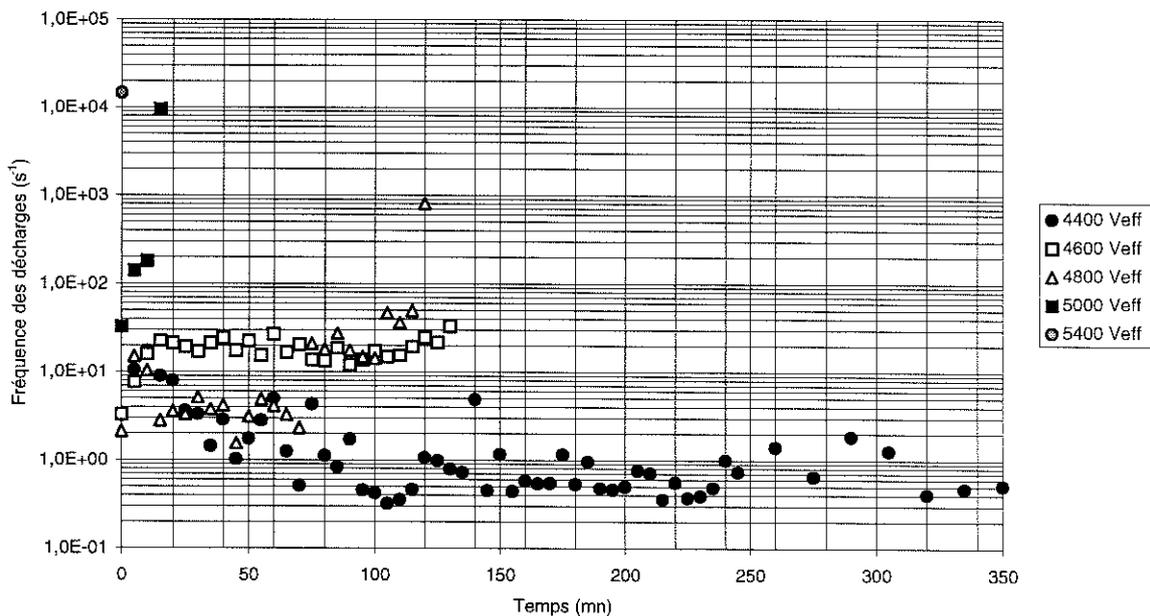


Figure 38. Fréquence des décharges en fonction du temps, cavité de 3 mm placée au milieu

III. 3. Cavité de 300 μ m de diamètre :

La figure 39 montre l'évolution de la fréquence des décharges enregistrées avec des cellules contenant un tel défaut. Les valeurs des fréquences sont extrêmement faibles et si on

prend comme critère de détermination de la TADP une fréquence seuil de plus de 1 décharge par seconde, alors on constate que la cellule d'étude peut claquer avant même que ce critère soit rempli, i.e. on détecte moins d'une décharge par seconde. Les quelques rares décharges enregistrées ont des charges apparentes d'environ 0,5 pC en valeur absolue, du même ordre que celles enregistrées avec des cavités de 3 mm de diamètre.

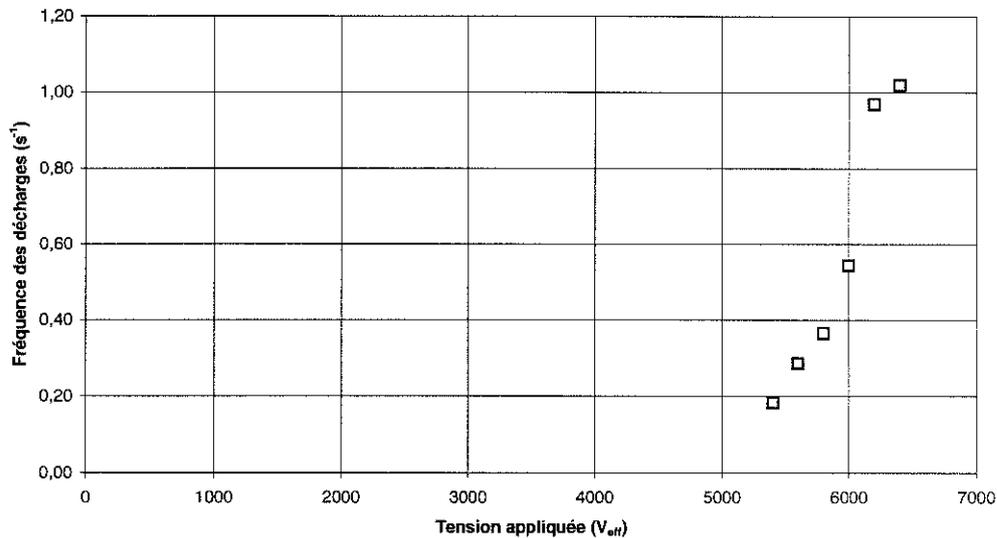


Figure 39. Evolution de la fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée

Le claquage survient à une tension moyenne de $6,1 \pm 0,2$ kV_{eff}. Cette valeur est supérieure de 8 % à la valeur obtenue avec des cavités de 3 mm de diamètre (cavités 10 fois plus grandes).

L'impact du claquage est un point noir situé sur la paroi du trou, comme dans le cas des cavités de 3 mm de diamètre.

Le faible nombre de mesures ne permet pas d'établir des distributions, ni de calculer des coefficients.

III. 4. Vieillessement de cellules contenant des cavités de 300 μm de diamètre :

La procédure de vieillissement est la même que celle décrite dans (paragraphe III. 1, chapitre III). La durée de vieillissement est de 3 mois. Les cellules utilisées contiennent une cavité de 300 μm de diamètre percée dans un des deux films de polypropylène, placée au milieu de la zone de croisement des armatures.

Pour chacune des 4 cellules, des acquisitions de décharges ont été effectuées en augmentant la tension appliquée.

La tension d'apparition des décharges n'évolue pas après vieillissement. Il en est de même pour la tension de claquage.

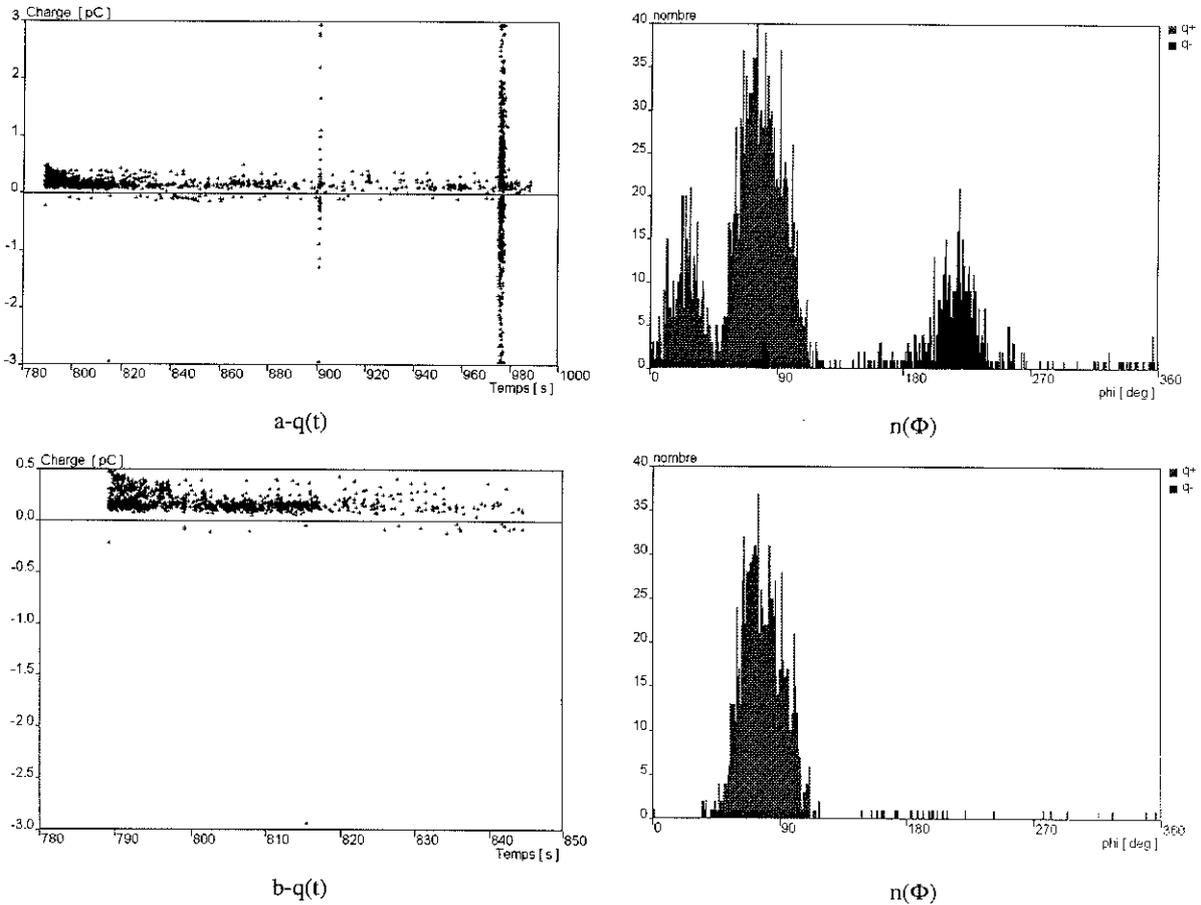
Par contre on remarque que les décharges sont nettement plus nombreuses après

vieillessement (tableau 11). Aussi, l'intensité des décharges diminue après vieillissement. On remarque également que les décharges sont nettement plus nombreuses en polarité positive. La cavité étant placée coté haute tension.

$V(V_{eff})$	n_+	n_-	$q_+(pC)$	$q_-(pC)$
5500	166	15	0,12	0,11
6000	3940	59	0,17	0,16
6500	3930	69	0,16	0,23

Tableau 11. Evolution du nombre de décharges positives et négatives et de leurs charges apparentes en fonction de la tension (Moyenne sur 4 cellules)

Les figures 40 (de a à c) représentent les graphes $q(t)$ et $n(\Phi)$ obtenus pour $V=6500 V_{eff}$.



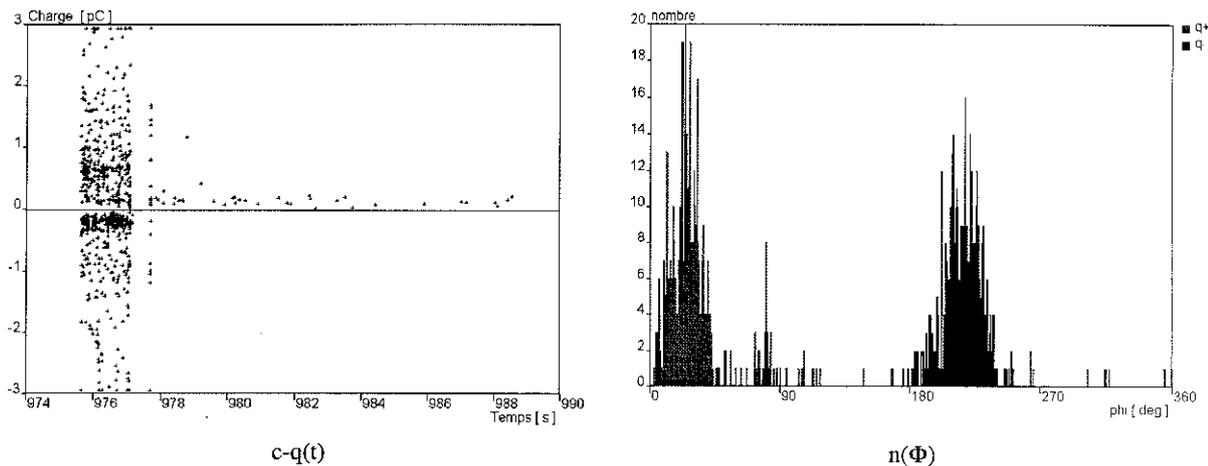
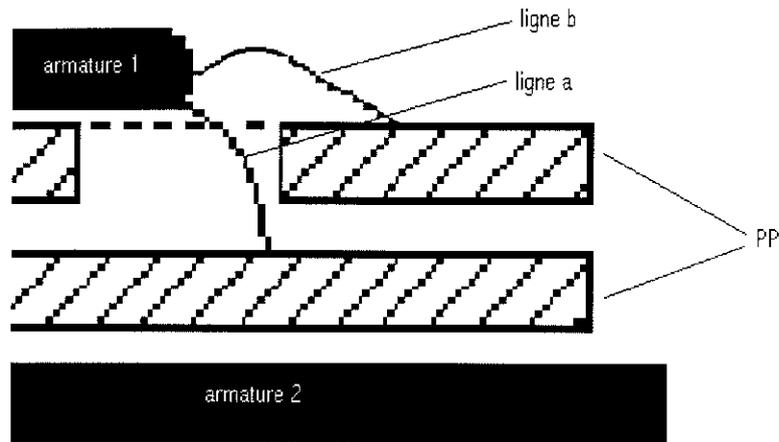


Figure 40. Evolution de l'allure des décharges pour $V=6500 V_{eff}$

La figure 40-a représente l'ensemble des décharges enregistrées pendant l'essai à $6500 V_{eff}$. La courbe $q(t)$ montre la présence d'un premier groupe de décharges essentiellement positives et dont l'intensité est d'environ 0,1 à 0,2 pC suivi de deux rafales de décharges nettement plus intenses. La seconde rafale conduit au claquage de la cellule. Nous avons effectué des zooms sur le premier groupe de décharges (figure 40 b) et sur la dernière rafale (figure 40-c). Les décharges du cas b rappellent par leur position dans la phase et l'effet de polarité qu'elles présentent les décharges du régime 1. La distribution $n(\Phi)$ du cas c est similaire à ce que l'on obtient pour les décharges du régime 2. C'est la formation d'une bulle de gaz qui provoque l'apparition d'une rafale de décharges qui conduisent au claquage.

III. 5. Discussion sur les phénomènes de décharges dans les cavités :

La tension d'apparition des décharges partielles est plus basse que celle obtenue avec une cellule sans défaut. Dans le cas d'une cellule sans défaut, la feuille de polypropylène joue le rôle de barrière pour les charges [Fox68], la décharge se propage alors dans le liquide sur une ligne de champ relativement éloignée du bord d'armature (ligne b sur la figure de la page suivante). Si une cavité est présente sur le bord d'armature alors les charges peuvent se déplacer sur une ligne de champ plus proche du bord d'armature (ligne a). Or le champ est fortement atténué dès qu'on s'écarte du bord d'armature. Ainsi les décharges peuvent se développer sur la ligne a pour une tension appliquée plus faible.



D'autre part, le champ moyen dans une cavité centrée dans la zone de croisement des deux armatures (donc soumise à un champ uniforme) est supérieur au champ moyen (intégrale sur la ligne de champ a) calculé à l'aide du logiciel SCSP. C'est ce qui justifie l'écart entre la TADP d'une cavité centrée et la TADP d'une cavité placée sur le bord d'armature.

La présence de deux régimes de décharges peut s'expliquer de la même manière que pour les décharges dans une cellule sans défaut : les décharges du 1^{er} régime apparaissent au delà d'un champ d'environ 1,9 MV/cm dans la cavité. Elles induisent la formation de micro bulles de gaz qui s'accumulent et forment une phase gazeuse importante qui sera le siège de décharges partielles du 2^{ème} régime.

La proximité de la cavité par rapport à l'électrode HT ou à la masse influe sur le rapport $n+/n-$ pour les décharges du 1^{er} régime qui dans le premier cas est inférieur à 1 alors qu'il est supérieur à 1 dans le second cas.

La taille de la cavité influe sur la tension d'apparition et sur la tension de claquage. Le nombre de décharges mesurées est nettement plus important dans le cas d'une grande cavité. Ceci peut s'expliquer par la multiplication des sites de décharges dans le cas d'une plus grande cavité et aussi par le rôle de la charge d'espace qui après une décharge se dépose sur les parois de la cavité modifiant le champ qui y règne. C'est d'autant plus sensible lorsque la taille de la cavité est réduite. Gaxiola et al [Gax95] ont montré expérimentalement que dans le cas de cavités cylindriques de 1 mm d'épaisseur, remplies d'air, l'augmentation de la surface de la cavité (donc du diamètre) a pour effet de réduire le champ seuil d'apparition des décharges partielles. Par exemple dans le cas d'une cavité dans du polyéthylène ($\epsilon_r=2,3$), le seuil passe de 6 kV/mm pour $s=0,1 \text{ mm}^2$ à 4 kV/mm pour $s=10 \text{ mm}^2$, soit une diminution de 33 %.

Pour les cavités de 300 μm , le claquage survient à une tension inférieure de 25 % à la tension de claquage d'une cellule saine même si on ne mesure que très peu ou pas de décharges. Après vieillissement, les tensions d'apparition et de claquage n'ont pas été

sensiblement modifiées. Les décharges sont par contre nettement plus nombreuses et moins intenses.

Enfin, les décharges enregistrées en présence de cavités de 3 mm de diamètre peuvent être caractérisées par leurs coefficients statistiques tels que EEF, les coefficients de position ou les Kurtosis de $n(\Phi)$ qui prennent de fortes valeurs positives lors du 1^{er} régime de décharges.

IV. PLI DANS UN FILM DE POLYPROPYLENE

IV. 1. Procédure expérimentale :

Un des deux films de PP constituant le diélectrique est plié. Une vue en coupe de la cellule est présentée ci-dessous (figure 41).

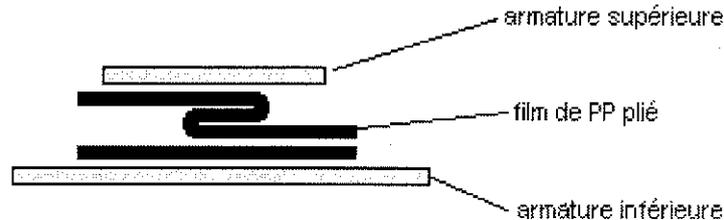


Figure 41. Schéma en coupe de la cellule contenant un film de PP plié

La tension est augmentée de $V=0$ à $V=5$ kV_{eff} à la vitesse de 100 V/s. Puis à partir de 5000 V_{eff}, les acquisitions sont effectuées tous les 200 V_{eff}. La durée de chaque acquisition est de 5 mn.

Les sites probables de décharges dans une telle géométrie sont: le voisinage immédiat des bords d'armature ou les espaces de liquide situés de part et d'autre du pli.

IV. 2. Résultats :

IV. 2. a. Tension d'apparition des décharges partielles :

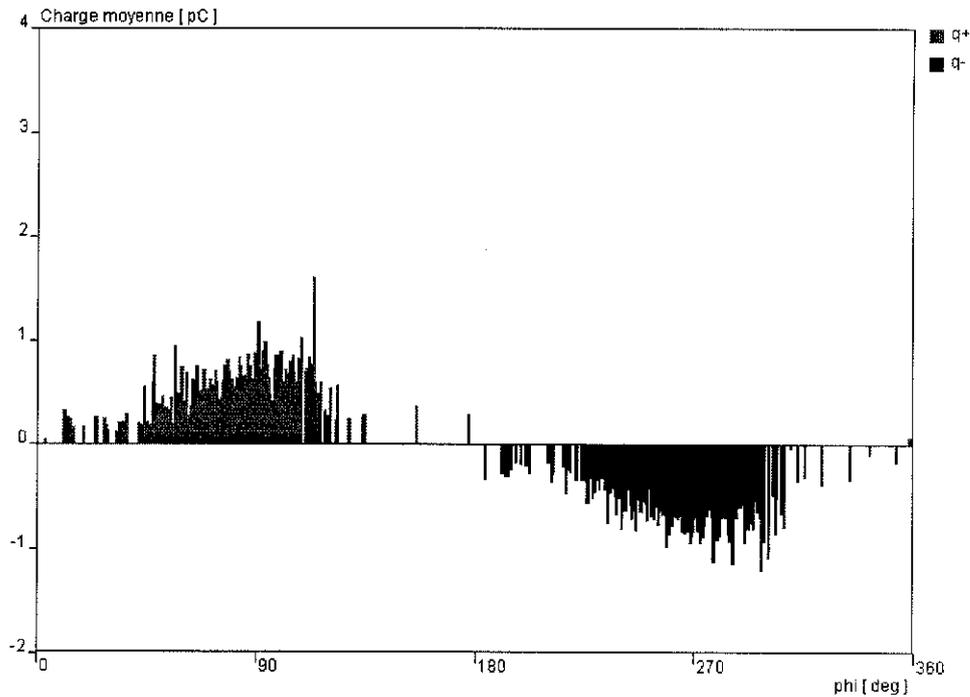
La tension d'apparition est de 6830 V_{eff} en moyenne, en augmentation de 20 % par rapport à la cellule sans défaut (voir tableau 13).

IV. 2. b. Evolution en fonction de la tension :

Il existe deux régimes de décharges avec une transition à 7,8 kV_{eff} (soit 5 à 6% au delà de la valeur obtenue avec une cellule sans défaut).

	TADP (V _{eff})	Tension de transition (V _{eff})	Tension de claquage (V _{eff})
Moyenne	6830	8100	8200
Ecart avec CSD (%)	+20	+6	négligeable

Tableau 13. Tensions caractéristiques moyennes

Figure 45. Distribution $Q_{\text{moy}}(\Phi)$ pour $V=7,2 \text{ kV}_{\text{eff}}$ (1^{er} régime)

IV. 2. d. Paramètres statistiques :

Les coefficients de positions aussi bien pour $n(\Phi)$ que pour $Q_{\text{moy}}(\Phi)$ sont de 0,45 environ, ce qui est nettement plus élevé que ceux d'une cellule sans défaut ou d'une cellule contenant une cavité. On remarque que le coefficient EEF (tableau 14) prend des valeurs proches de 1 jusqu'à la transition au 2^{eme} régime.

$V(V_{\text{eff}})$	6800	7200	7400	7600	7800	8000	8200
EEF	0,93	0,97	0,97	0,95	0,97	0,95	0,74

Tableau 14. Coefficient EEF en fonction de la tension appliquée

IV. 3. Discussion:

Les décharges partielles ont lieu dans les poches de liquide de part et d'autre du pli (figure 41). En effet, les expériences avec des cavités de 3 mm ont montré que la présence d'une épaisseur de liquide suffisante entre les deux armatures favorise l'apparition des décharges à des tensions inférieures à la TADP en bord d'armature.

Si les décharges étaient générées sur les bords d'armature, alors le rapport des TADP (entre ce défaut et le cas d'une cellule sans défaut) devrait être égal à la racine carrée du rapport des épaisseurs, soit $\sqrt{2}$ (la TADP obtenue avec 4 films de PP est égale à 7,8 kV_{eff}), or expérimentalement ce rapport n'est que de 1,21 environ.

Pour que les décharges soient générées dans les poches de liquide de part et d'autre du pli, il faut que le champ qui y règne soit du même ordre que le champ moyen dans une cavité E_c calculé dans le paragraphe III. 2. a. de ce chapitre, soit environ 1,9 MV/cm. Or l'épaisseur du liquide e_l est dans ce cas double. D'où la tension aux bornes de l'épaisseur de liquide $V_l = E_c e_l$ et la tension aux bornes de la cellule V est déduite par la formule suivante :

$$V_l = V \frac{\epsilon_s}{\epsilon_s + \epsilon_l}$$

Ce qui donne : $V = 8800 V_{\text{eff}}$ à comparer à la TADP obtenue expérimentalement et qui vaut $6830 V_{\text{eff}}$.

L'écart entre ces deux tensions peut s'expliquer par l'influence du diamètre de la cavité ainsi que du fait que les extrémités des films ont tendance à se rabattre, ce qui réduit l'épaisseur du liquide.

Il existe des similitudes avec les décharges dans une cavité comme l'intensité des décharges ainsi que l'allure des distributions statistiques.

CHAPITRE V

SYNTHESE SUR L'IDENTIFICATION D'UNE SOURCE DE DECHARGES PARTIELLES

CHAPITRE V

Synthèse sur l'identification d'une source de décharges

Ce dernier chapitre présente une synthèse sur les outils d'identification des décharges. Les différents cas de décharges étudiés sont rappelés (décharges dans une cellule sans défaut, décharges générées par un défaut artificiellement introduit). Les décharges en pointe-plan dans l'air sont ajoutées à la base de données.

Dans une seconde partie, les décharges sont caractérisées par leur évolution en fonction de la durée d'application de la tension. Les différents paramètres de reconnaissance sont ensuite passés en revue. Pour chaque source de décharge, l'intervalle de variation de chaque paramètre (de la valeur minimale à la valeur maximale) est donné. Enfin, un algorithme de reconnaissance basé sur les coefficients est proposé.

I. LISTE DES DEFAUTS ETUDIES

Symbole	Signification
csd	décharges en bord d'armature d'une cellule sans défaut
cav3mm	cavité de 3 mm de diamètre
cav300 μ	cavité de 300 μ m de diamètre
impr	défaut d'imprégnation
cont	défaut de contact
pli	film de PP plié
ptpl	pointe/plan dans l'air

II. EVOLUTION DES DECHARGES EN FONCTION DU TEMPS

csd	stabilité dans le régime 1 et claquage au bout de quelques minutes dans le régime 2
cav3mm	claquage au bout de quelques minutes à quelques heures
cav300 μ	claquage au bout de quelques minutes parfois sans détecter des décharges
impr	claquage au bout d'un temps qui dépend de la tension et de la dimension de la marge. Pour $V < 1000 V_{eff}$ disparition des décharges
cont	si on applique des surtensions les décharges disparaissent
pli	claquage au bout de quelques minutes à quelques heures

Remarque : Pour un cas donné, lorsque deux régimes de décharges sont enregistrés alors le symbole est suivi d'un numéro (1 ou 2) indiquant le régime correspondant. Exemple : csd1, csd2.

Nocivité: Les défauts étudiés sont classés par ordre décroissant de nocivité (évaluée par la tension d'apparition, l'évolution en fonction du temps, le temps de retard au claquage).

1. Défaut d'imprégnation
2. Cavité de 3 mm de diamètre
3. Cavité de 300 μm de diamètre
4. Film de PP plié
5. Défaut de contact

III. PARAMETRES SERVANT A LA RECONNAISSANCE

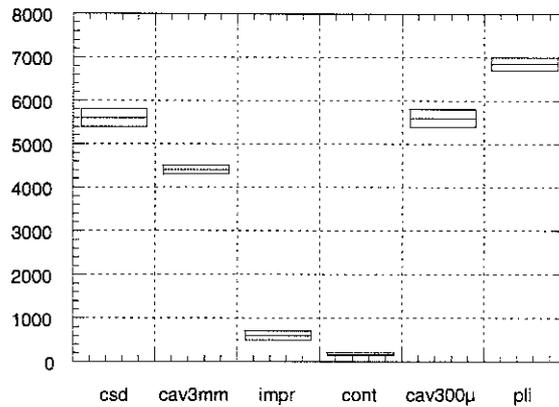
Symbole	Paramètre	Unité
TADP	Tension d'apparition des décharges partielles	V_{eff}
Transition	Tension de transition entre les deux régimes de décharges	V_{eff}
Pos_n	Coefficient de position de la distribution $n(\Phi)$	sans dimension
Pos_q	Coefficient de position de la distribution $Q_{\text{moy}}(\Phi)$	sans dimension
EEF	Coefficient d'efficacité énergétique	sans dimension
Sk_n	Moment d'ordre 3 ou Skewness de la distribution $n(\Phi)$	sans dimension
Sk_q	Moment d'ordre 3 ou Skewness de la distribution $Q_{\text{moy}}(\Phi)$	sans dimension
Ku_n	Moment d'ordre 4 ou Kurtosis de la distribution $n(\Phi)$	sans dimension
Ku_q	Moment d'ordre 4 ou Kurtosis de la distribution $Q_{\text{moy}}(\Phi)$	sans dimension

IV. VALEURS DES PARAMETRES

Chaque paramètre est représenté sous forme de graphique où sont reportés en abscisse les défauts et en ordonnées l'intervalle de variation du paramètre. Pour le défaut d'imprégnation, les coefficients correspondent aux décharges enregistrées lors des premières minutes de mise sous tension. La variabilité des allures des distributions des décharges en fonction du temps pour ce défaut ne nous permet pas de donner des valeurs globales.

Pour un coefficient donné, l'absence de valeur signifie que trop peu de décharges sont enregistrées pendant la durée d'acquisition (5 minutes), ce qui ne permet pas d'établir une statistique fiable. Exemple : on ne donne pas de valeurs des moments d'ordre 3 et 4 pour le cas pli1.

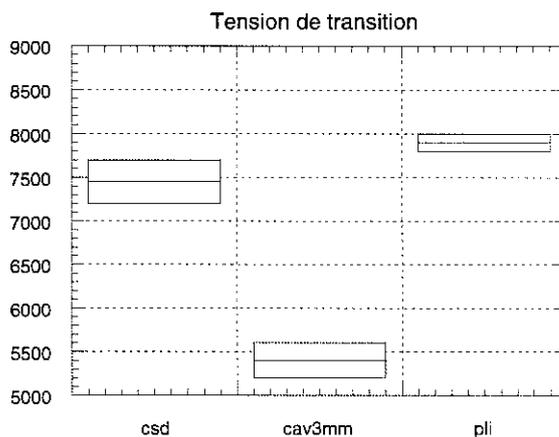
IV. 1 Tension d'apparition:



Seuls les défauts d'imprégnation et de contact peuvent être caractérisés par leur TADP qui est très basse par rapport à celle d'une cellule sans défaut. Concernant les cavités, un diamètre de 3 mm paraît peu probable dans un condensateur bien fabriqué. Dans le cas d'une cavité de 300 µm, la TADP est identique à celle d'une cellule sans défaut. Dans le cas d'un pli, la TADP obtenue est supérieure à celle d'une cellule sans défaut car l'épaisseur de diélectrique est augmentée.

IV. 2 Tension de transition:

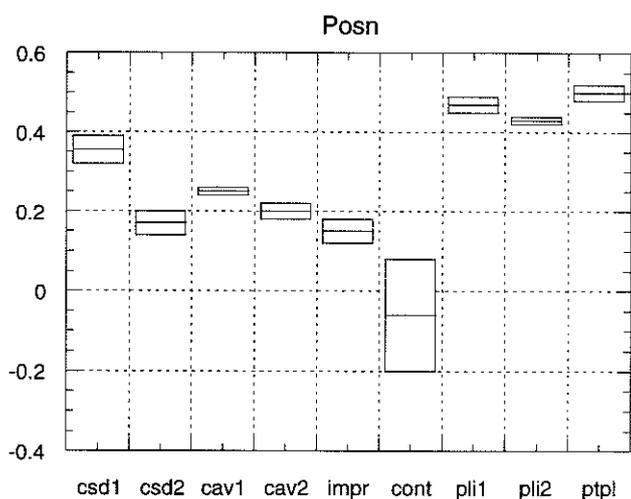
Nous avons rassemblé ces résultats dans un tableau sous forme schématique mais on ne considère pas cette tension de transition comme un paramètre d'identification d'une source de décharges.



IV. 3 Coefficients de position:

Ces paramètres varient de -0,5 à 0,5. Une variation de 0,1 d'un de ces paramètres équivaut à un déplacement de 20° de la distribution correspondante sur l'onde de tension.

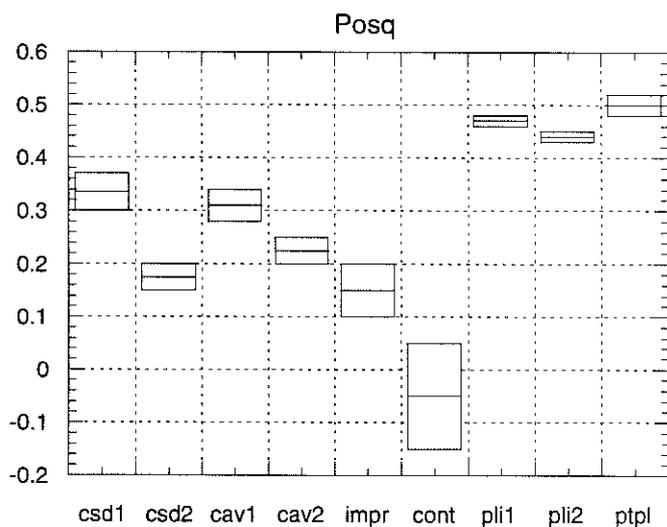
IV. c. 1. Pos_n



On distingue 3 classes de défauts :

1. Pos_n ≈ 0, défaut de contact
2. Pos_n ≈ 0,2, cavité ou défaut d'imprégnation
3. Pos_n ≈ 0,45, pli

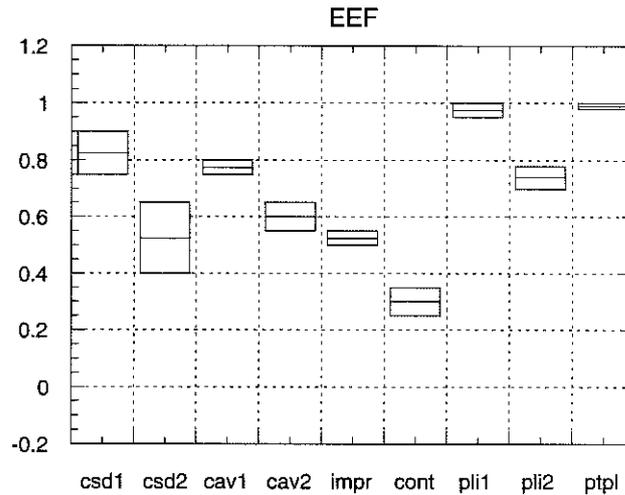
IV. c. 2. Pos_q:



On distingue également 3 classes de défauts :

1. $Posq \approx 0$, défaut de contact
2. $0,1 < Posq < 0,35$, cavité ou défaut d'imprégnation, le cas cav1 est sur la borne supérieure de cet intervalle
3. $Posq \approx 0,45$, pli

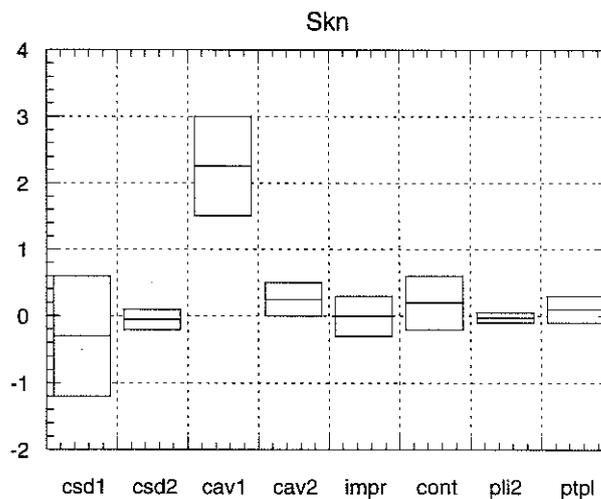
IV. 4 Coefficient EEF:



Ce paramètre permet également une bonne distinction entre les défauts à part les cas csd2, cav2 et imprégnation.

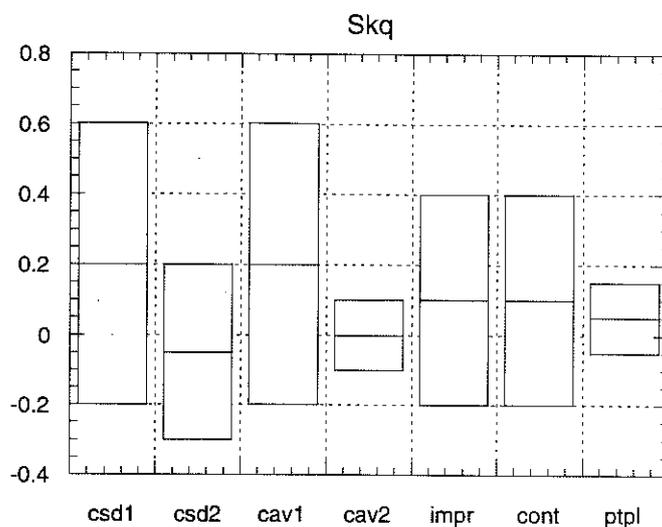
IV. 5 Moments d'ordre 3:

IV. 5. a. Sk_n :



Les valeurs sont identiques pour tous les défauts sauf pour le cas cav1.

IV. 5. b. Sk_q :

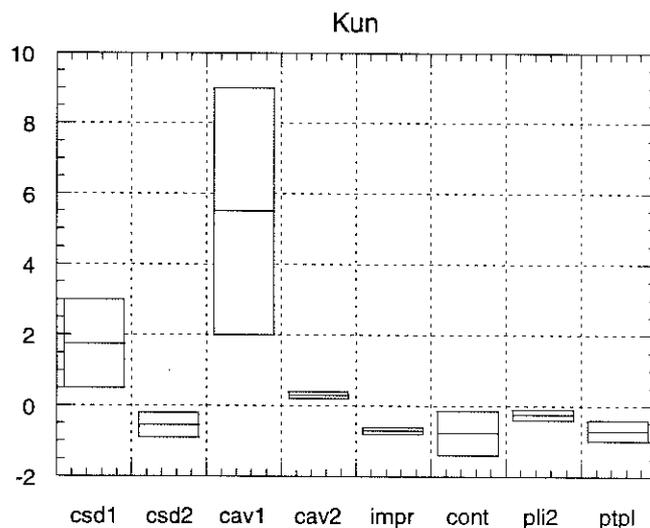


On retrouve les mêmes remarques qu'avec Sk_n . On note également une grande dispersion des valeurs de ce coefficient.

Les moments d'ordre 3 ne sont pas très utiles dans l'identification d'une source de décharge.

IV. 6. Moments d'ordre 4:

IV. 6. a. Ku_n :

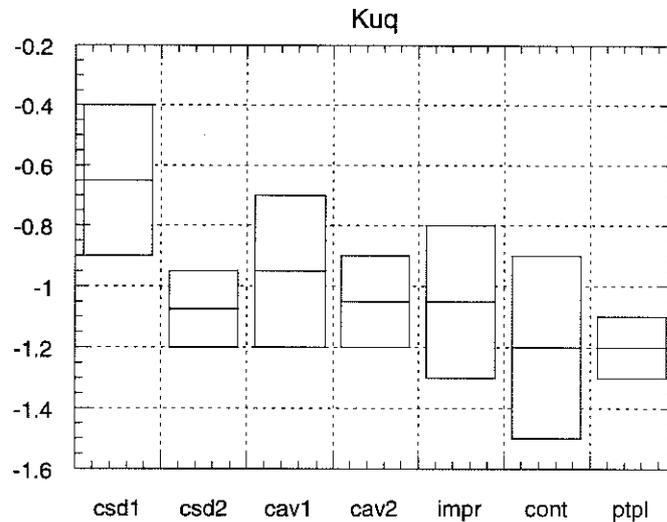


Il existe deux groupes de défauts :

- 1.csd1 et cav1 avec $Ku_n > 0$, ce qui indique une distribution $n(\Phi)$ pointue

2. les autres défauts avec $K_{un} \approx 0$, ce qui signifie que $n(\Phi)$ a une allure arrondie

IV. 6. b. K_{uq} :



Les moments d'ordre 4 ne sont pas d'un grand apport pour l'identification d'une source de décharge car leurs valeurs sont trop dispersées et on retrouve quasiment les mêmes valeurs quelque soit le défaut.

V. ALGORITHME DE RECONNAISSANCE D'UNE SOURCE DE DECHARGE

La présence de décharges à une tension donnée est un premier critère de reconnaissance. En effet si des décharges sont enregistrées à une tension de quelques centaines de Volts, on en déduit que ces décharges ne peuvent pas être attribuées à un des cas suivants : csd1, csd2, cav1, cav2, pli1, pli2. Par exemple, le cas impr est obtenu à des tensions supérieures ou égales à 500 Volts tandis que les cas csd2 et cav2 qui ont des similitudes avec le cas impr comme on le verra par la suite sont obtenus pour des tensions de plus de 5000 Volts. Or à cette tension un défaut d'imprégnation provoque le claquage quasiment instantanément (ou au bout de quelques secondes).

Les coefficients de position Pos_n et Pos_q ainsi que le coefficient EEF permettent de différencier 2 à 2 l'ensemble des cas sauf les cas csd2, cav2 et impr. Ceci est lié au fait que ces trois cas sont très proches car ils correspondent à des décharges dans des bulles (dues à un défaut d'imprégnation ou créées par les décharges). Cependant, on remarque une similitude plus forte entre les cas csd2 et impr. Les valeurs des coefficients Pos_n et Pos_q du cas cav2 sont différentes de celles obtenues avec les deux autres cas. Cela s'explique par la nature des défauts : en effet, dans les cas csd2 et impr les bulles sont sur les bords d'armature alors que dans le cas cav2, les bulles restent confinées à l'intérieur de la cavité.

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. [Abd94] H. Abdi, *Les réseaux de neurones*, Presses Universitaires de Grenoble, 1994.
2. [Aus41] A. E. W. Austen et S. Whitehead, *Discharges in Insulation under Alternating Current Stresses*, Journal IEE, Vol. 88, Part II, pp. 18-22, 1941.
3. [Bar69] R. Bartnikas et J. Levi, *A Simple Pulse-Height Analyser for Partial Discharge Rate Measurements*, IEEE Trans. Instr. and Meas., Vol. 18, pp. 341-345, 1969.
4. [Bar72] R. Bartnikas, *Effect of Pulse Rise Time on the Response of Corona Detectors*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 7, N° 1, pp. 3-8, 1972.
5. [Bar79] R. Bartnikas, *Engineering Dielectrics, Vol. I, Corona Measurement and Interpretation*, ASTM 1979.
6. [Bar87] R. Bartnikas, Whitehead Memorial Lecture, *A Commentary on Partial Discharge Measurement and Detection*, IEEE, Trans. Electr. Insul., Vol. 22, N° 5, pp. 629-653, 1987.
7. [Bar93] R. Bartnikas et J. P. Novak, *On the Character of Different Forms of Partial Discharges and their Related Terminologies*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 28, N° 6, pp. 956-968, 1993.
8. [Bas55] H. Basseches et D. A. Mc Lean, *Gassing of liquid Dielectrics under Electrical Stress*, CEI, Vol. 47, N° 9, Septembre 1955.
9. [Ber] N. Berger, Communication privée.
10. [Ber86] N. Berger et P Jay, *A New Impregnant for HV Capacitors*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 21, N° 1, pp. 59-63, 1986.
11. [Ber87] N. Berger et P Jay, *Impregnant-Polypropylene Interactions in the All-Film Capacitor Configuration*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 22, N° 4, pp. 383-388, 1987.
12. [Bez88] P. Bezborodko, *Etude des mécanismes de décharges partielles dans des cavités gazeuses au contact d'isolants solides ou liquides. Relation avec le phénomène de gassing des liquides*, Thèse INPG, Grenoble, 1988.
13. [Bla83] D. T. A. Blair, *Breakdown in gases*, Electrical insulation, Peter Peregrinus Ltd, London, 1983.
14. [Bog82] S. A. Boggs et G. C. Stone, *Fundamental Limitations in the Measurement of Corona and Partial Discharge*, IEEE trans. Electr. Insul., Vol. 17, N° 2, pp. 143-150, 1982.
15. [Bro93] M. Brouche, J. P. Gosse et B. Gosse, *Conduction de liquides aromatiques en géométrie pointe-plan*, J. Phys. III, N° 6, pp. 1111-1121, 1993.
16. [Bro94] M. Brouche, *Conduction électrique dans les hydrocarbures aromatiques sous champ intense*, Thèse, Grenoble, 1994.
17. [Cac95] C. Cachin et H. J. Wiesmann, *PD Recognition with Knowledge-Based Preprocessing and Neural Networks*, IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., Vol. 2, N° 4, pp. 578-589, 1995.
18. [Cac96] M. Cacciari, A. Contin, G. Mazzanti et G. C. Montanari, *Identification and Separation of Two Concurrent Partial Discharge Phenomena*, Proc. IEEE Conf. Electr. Insul. Diel. Phen., pp. 476-479, San Fransisco, 1996.
19. [CEI 81] *Partial Discharge Measurements*, IEC 270, 1981.
20. [Cha91] J. C. Chan, P. Duffy, L. J. Hiivala et J. Wasik, *PD Testing of Solid Dielectric Cable*, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 7, N° 5, pp. 9-20, 1991.
21. [Cig69] Groupe de travail 21.03 de la CIGRE, *Electra*, N° 11, pp. 61-98, 1969.
22. [Dak74] Dakin et al., *Phénomènes disruptifs dans les gaz en champ uniforme*, *Electra*, Vol. 32, pp. 61-86, 1974.

- 23.[Coe71] R. Coelho et J. Debeau, *Properties of the Tip-Plane Configuration*, J. Phys. D, Appl. Phys., Vol. 4, pp. 1266-1280, 1971.
- 24.[Dan93] M. G. Danikas, *The Definitions Used for Partial Discharge Phenomena*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 28, N°. 6, pp. 1075-1081, 1993.
- 25.[Del78'] W. de la Rue et W. H. Müller, *Experimental Researches on the Electric Discharges with the Chloride Silver Battery*, Phil. Trans. 168, pp. 51-151, 1878.
- 26.[Den87] A. Denat, J. P. Gosse et B. Gosse, *Conduction du Cyclohexane très pur en géométrie pointe-plan*, Rev. Phys. Appl. 22, pp. 1103-1111, 1987.
- 27.[Ele72] *Elimination des perturbations dans la détection des décharges*, Electra N°. 21, pp. 55-72, Mars 1972.
- 28.[Fau90] C. Faure et L. Miclet, *Reconnaissance des formes*, Techniques de l'ingénieur, Traité informatique, H1 920, 1990.
- 29.[Fou90] R. FOURNIE, *Condensateurs de puissance tout-film*, essais d'endurance et mécanismes de dégradation, EDF, Bulletin de la DER, Série B, pp. 1-15, 1990.
- 30.[Fox68] M. Fox, K. W. Plessner et M. M. J. Hall, *Theory of Discharges at the Foil Edge in Capacitors*, Proc. IEE, Vol. 115, N°. 7, pp. 1027-1033, 1968.
- 31.[Fuh93] J. Fuhr, M. Haessig, P. Boss, D. Tschudi et R. A. King, *Detection and Location of Internal Defects in the Insulation of Power Transformers*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 28, N°. 6, pp. 1057-1067, 1993.
- 32.[Füz91] S. Füzesséry, *Polypropylènes*, Techniques de l'ingénieur AM2, A3 320, pp. 1..15, 1991.
- 33.[Gax95] E. H. R. Gaxiola, J. M. Wetzer, *The influence of dielectric material on partial discharges in voids*, 9th ISH, Graz, Austria, 1995.
- 34.[Gos96] B. Gosse, R. Hammal, P. O. Sassoulas et J. P. Gosse, *Analysis of Partial Discharges in a Capacitor-Type Structure*, Proc. CEIDP, pp. 510-513, San Francisco, 1996.
- 35.[Gul92] E. Gulski et F. H. Kreuger, *Computer-Aided Recognition of Discharge Sources*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 27, N°. 1, pp. 82-92, 1992.
- 36.[Gul93] E. Gulski, *Computer-Aided Measurements of Partial Discharges in HV Equipment*, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. 28, N°. 6, pp. 969-983, 1993.
- 37.[Gul293] E. Gulski et A. Krivda, *Neural Networks as a Tool for Recognition of Partial Discharges*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 28, N°. 6, pp. 984-1001, 1983.
- 38.[Gul95] E. Gulski, *Digital Analysis of Partial Discharges*, IEEE Trans. Diel. Electr. Insul, Vol. 2, N°. 5, pp. 822-837, 1995.
- 39.[Hai88] M. Haidara, *Impulsions de Trichel dans le cyclohexane liquide et les gaz comprimés*, Thèse de l'université Joseph Fourier, Grenoble, 1988.
- 40.[Ham95] R. Hammal, Rapport de contrat EDF/LEMD, N°. 1, Juin 1995.
- 41.[Ham96] R. Hammal, Rapport de contrat EDF/LEMD, N°. 4, Juillet 1996.
- 42.[Han93] C. Hantouche et D. Fortuné, *Digital Measurements of Partial Discharges in Full-Sized Power Capacitors*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 28, N°. 6, pp. 1025-1032, 1993.
- 43.[Han95] C. Hantouche, *Partial Discharges as a Diagnostic Tool for Power Capacitor*, EDF, DER, Dép. CIMA, 1995.
- 44.[Han97] C. Hantouche, *Condensateurs de puissance*, Techniques de l'ingénieur, D 4710, pp. 1-26, 1997.

- 45.[Hey65] Von H. Heywang et H. Preißinger, *Verteilung des elektrischen Feldes in Kondensatoren mit metallisierten Dielektriken*, Frequenz, N°. 7, pp. 242-246, 1965.
- 46.[Hon96] T. Hong, M. T. C. Fang et D. Hilder, *PD Classification by a Modular Neural Network based on Task Decomposition*, IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., Vol. 3, N°. 2, pp. 207-212, 1996.
- 47.[Hoz92] N. Hozumi, T. Okamoto et T. Imajo, *Discrimination of Partial Discharge Pattern using a Neural Network*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 27, N°. 3, pp. 550-556, 1992.
- 48.[Hüc95] T. Hücker et H. G. Kranz, *Requirements of PD Automated Diagnosis Systems for Fault Identification in Noisy Conditions*, IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., Vol. 2, N°. 4, pp. 544-556, 1995.
- 49.[Jom97] F. Jomni, *Etude des phénomènes hydrodynamiques engendrés dans les liquides diélectriques par un champ électrique très intense*, Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 1997.
- 50.[Kär76] S. Kärkkäinen, *Internal Partial Discharge Pulse Distributions, Physical Mechanisms and Effects on Insulations*, Thèse, Helsinki Institute of Technology, Finland, 1976.
- 51.[Kat90] R. Kattan, *Etude de la formation et de la dynamique des bulles dans les hydrocarbures liquides générées par des impulsions de courant en champ électrique intense*, Thèse de l'université Joseph Fourier, Grenoble, 1990.
- 52.[Kra67] Z. Krasucki, *Effect of the Dielectric Thickness on the Onset of Discharges in Liquid-Solid Dielectrics*, Rapport N°. 5197, ERA, 1967.
- 53.[Kra92] H. G. Kranz et R. Krump, *Partial Discharge Diagnosis using Statistical Optimization on a PC-Based System*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 27, N°. 1, pp. 93-98, 1992.
- 54.[Kre89] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment*, Butterworths, 1989.
- 55.[Kre93] F. H. Kreuger, E. Gulski et A. Krivda, *Classification of Partial Discharges*, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol. 28, N°. 6, pp. 917-931, 1993.
- 56.[Kre94] F. H. Kreuger, P. H. F. Morshuis et E. Gulski, *Evaluation des avaries dues aux décharges lors de transitoires rapides et analyse statistique*, CIGRE, Réf. 15-106, 1994.
- 57.[kri95] A. Krivda, *Recognition of Discharges, Discrimination and Classification*, Thèse, Delft University Press, 1995.
- 58.[Kut66] G. S. Kutchinsky, D. A. Kaplan, Y. S. Pintal, I. S. Pereselentsev, S. K. Medvedev, G. T. Messerman et A. K. Mann, *Partial Discharges and Service Life of Capacitor Insulation*, CIGRE, N°. 137, 1966.
- 59.[Lam74] W. L. Lama et C. F. Gallo, *Systematic Study of the Electrical Characteristics of the Trichel Current Pulses from Negative Point-to-Plane Coronas*, J. Appl. Phys., Vol. 45, N°. 1, pp. 103-113, 1974.
- 60.[Les83] O. Lesaint et R. Tobazéon, *Gas Generation into Liquids at the Edge of Thin Metallic Foils*, CIGRE WG15-02, 1983.
- 61.[Llo29] W. L. Lloyd et E. C. Starr, *Methods used in Investigating Corona Loss by Means of the Cathode Ray Oscillograph*, AIEE Trans., Vol. XLVIII, pp. 317-326, 1929.
- 62.[Lun192] L. E. Lungaard, *Partial Discharge-Part XIII, Acoustic Partial Discharge Detection-Fundamental Considerations*, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 8, N°. 4, pp. 25-31, 1992.
- 63.[Lun292] L. E. Lungaard, *Partial Discharge-Part XIV, Acoustic Partial Discharge Detection-Practical Application*, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 8, N°. 5, pp. 34-43, 1992.

- 64.[Mat76] K. N. Mathes, *Influence of Electrical Discharges in Oil and Combinations of Oil and Paper*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 11, N° 4, pp. 164-180, 1976.
- 65.[Mas53] J. H. Mason, *The Deterioration and Breakdown of Dielectrics Resulting from Internal Discharges*, Journal IEE, Vol. 100, Part I, pp. 149-158, 1953.
- 66.[Mas78] J. H. Masson, *Discharges*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 13, N° 4, pp. 211-238, 1978.
- 67.[Maz93] A. A. Mazroua, M. M. A. Salama et R. Bartnikas, *PD Pattern Recognition with Neural Networks using the Multilayer Perceptron Technique*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 28, N° 6, pp. 1082-1089, 1993.
- 68.[Maz94] A. A. Mazroua, R. Bartnikas et M. M. A. Salama, *Discrimination between PD Pulse Shapes using Different Neural Network Paradigms*, IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., Vol. 1, N° 6, pp. 1119-1131, 1994.
- 69.[McC94] F. M. J. Mc Cluskey et A. Denat, *Bubble Formation in Synthetic Insulating Liquids in a Pulsed Divergent Electric Field*, IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., Vol. 1, N° 4, pp. 672-679, 1994.
- 70.[Mey80] R. Meyrueix, *Etude de la génération et du comportement d'une phase gazeuse dans un liquide diélectrique soumis à un champ électrique*, Thèse INPG, Grenoble, 1980.
- 71.[Mor93] P. H. F. Morshuis, *Partial Discharge Mechanisms*, Thèse, Delft University Press, 1993.
- 72.[Nat88] D. A. Natrass, *Partial Discharge Measurement and Interpretation*, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 4, N° 3, pp. 10-23, 1988.
- 73.[Nem93] M. Nemamcha, *Décharges électriques dans différentes structures d'isolation imprégnée*, Thèse de doctorat d'état algérien préparée au LEMD, CNRS, Grenoble, 1993.
- 74.[Nuc85] C. A. Nucci, F. Tarroni et D. Zanobetti, *Characteristics of Dielectric Fluids for Medium-Voltage Power Capacitors*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 20, N° 2, pp. 423-426, 1985.
- 75.[Oka86] T. Okamoto et T. Tanaka, *Novel Partial Discharge Measurement, Computer-Aided Measurement Systems*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 21, N° 6, pp. 1015-1019, 1986.
- 76.[Pai40] E. B. Paine et H. A. Brown, *Corona Discharge in Rubber Insulated Cables*, AIEE Trans., Vol. 59, pp. 709-714, 1940.
- 77.[Pas89'] F. Paschen, *Über die zum funkenübergang in luft, wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen drucken erforderliche potential differenz*, Ann. Der Physik, 37, 69, 1889.
- 78.[Pet12] W. Petersen, *Beiträge zur Berechnung der Hochspannungsisolierung*, Archiv für Elektrotechnik, Vol. 1, N° 1, pp. 28-33, 1912.
- 79.[Pin65] Y. S. Pintal, *Caractéristiques d'ionisation et de vieillissement du diélectrique papier-huile de condensateurs*, Emile Haefely&Cie, Bale-Condensateurs- Elektrotechnika, 36, 1965.
- 80.[Pre89] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky et W. T. Vetterling, *Statistical Description of Data*, Numerical Recipes in C, Chap. 13, Cambridge University Press, pp. 471-476, 1989.
- 81.[Pro83] Technical information, Ugilec C101, Prodelec, septembre 1983.
- 82.[Rei86] R. C. Reid, J. M. Prausnitz et B. E. Poling, *the properties of gases & liquids*, 4th edition, McGraw-Hill Book Company, 1986.

- 83.[Sar90] W. J. Sarjeant, *Capacitors*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 25, N° 5, pp. 861-922, 1990.
- 84.[Sat93] L. Satish et B. Gururaj, *Use of Hidden Markov Models for Partial Discharge Pattern Classification*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 28, N° 2, pp. 172-182, 1993.
- 85.[Seb89] E. Sebillotte, *Dégradation sous champ électrique alternatif du polypropylène imprégné, influence des époxydes*, Thèse INPG, 1989.
- 86.[Seg97] B. Seguin, *Les pertes dans les condensateurs bobinés utilisés en Electronique de Puissance*, Thèse INPG, 1997.
- 87.[Sel94] A. G. Sellars, O. Farish et B. F. Hampton, *Assessing the Risk of Failure due to Particle Contamination of GIS using the UHF Technique*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 1, N° 2, pp. 323-331, 1994.
- 88.[Sel95] A. G. Sellars, O. Farish, B. F. Hampton et L. S. Pritchard, *Using the UHF Technique to Investigate PD Produced by Defects in Solid Insulation*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 2, N° 3, pp. 448-459, 1995.
- 89.[She24] H. Shering, *Die Isoliestoffe der Elektrotechnik*, Verlag Julius Springer, Berlin 1924.
- 90.[Suz92] H. Suzuki et T. Endoh, *Pattern Recognition of Partial Discharge in XLPE Cables using a Neural Network*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 27, N° 3, pp. 543-549, 1992.
- 91.[Tak76] E. Takahashi, Y. Tsutsumi, K. Okuyama et F. Ogata, *Partial Discharge Characteristics of Oil Immersed Insulation Systems under DC, Combined AC-DC and DC Reversed Polarity Voltage*, IEEE Trans. Pow. App. Syst., Vol. 95, N° 1, pp. 411-420, 1976.
- 92.[Tan78] T. Tanaka et T. Okamoto, *A Mini-Computer Based Partial Discharge Measurement System*, Proc. IEEE Int. Symp. Electr. Insul., pp. 86-89, Philadelphia, 1978.
- 93.[Tan80] T. Tanaka et T. Okamoto, *Analysis of q-n and Φ -n Characteristics of Partial Discharge in Several Electrode Systems*, Proc. IEEE Int. Symp. Electr. Insul., pp. 190-193, 1980.
- 94.[Tat85] T. Tatsuki et T. Tanaka, *Prediction of Treeing Breakdown from Pulse Height of Partial Discharges on Voltage-Phase Angle*, Jap. Journal of Appl. Phys., Vol. 19, 1985.
- 95.[Van94] R. J. Van Brunt, Whitehead Memorial Lecture, *Physics and Chemistry of Partial Discharge and Corona*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol ; 1, N° 5, pp. 761-784, 1994.
- 96.[War92] B. H. Ward, *Digital Techniques on Partial Discharge Measurements-A Report on the Activities of the Working Group on Digital Analysis of Partial Discharges*, IEEE Trans. Pow. Deliv., Vol. 7, N° 2, pp. 469-479, 1992.
- 97.[Web86] H. J. Weber, R. E. Seeberger et G. Slope, *Field Measurements of Partial Discharges in Potential Transformers*, IEEE Electr. Insul. Mag., N° 2, Vol. 5, pp. 34-38, 1986.
- 98.[Wei95] M. Weinfeld, *Réseaux de neurones*, Techniques de l'ingénieur, Traité informatique, H1 990, 1995.
- 99.[Wet89] J. M. Wetzler et P. C. T. Van der Laan, *Prebreakdown Currents*, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 24, N° 2, pp. 297-308, 1989.
- 100.[Whi53] S. Whitehead, *Dielectric Breakdown of Solids*, Oxford University Press, London, 1953.
- 101.[Yan92] T. Yanagisawa, S. Iwamoto, T. Okamoto et H. Fukagawa, *Recognition of Partial Discharge Pattern of Electrode Voids by Neural Networks*, Electr. Eng. in Japan, Vol. 112, N° 2, pp. 110-115, 1992.

ANNEXES

ANNEXE 1

Les condensateurs de puissance

I. FONCTIONS ASSUREES PAR LES CONDENSATEURS DE PUISSANCE :

Parmi les principales fonctions des condensateurs de puissance utilisés dans les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique, on peut citer: la compensation de la puissance réactive, le stockage de l'énergie, le filtrage des harmoniques [Han97].

Notre étude concerne les condensateurs utilisés dans le cadre de la compensation de la puissance réactive (ou de l'amélioration du facteur de puissance $\cos \varphi$).

II. NOTION DE PUISSANCE REACTIVE :

L'énergie électrique est transportée des centres de production vers les centres de consommation (charge) sous deux formes: une composante active exprimée en kilo Watts (kW) et une composante réactive exprimée en kilo Volts-Ampères réactifs (kvar).

La charge est principalement inductive. Par convention, une inductance L parcourue par un courant sinusoïdal de valeur efficace I de pulsation ω consomme une puissance réactive Q_L :

$$Q_L = L\omega I^2 \quad (A1.1)$$

Un élément capacitif C fournit une puissance réactive Q_C lorsqu'il est soumis à une tension sinusoïdale V de pulsation ω :

$$Q_C = C\omega V^2 \quad (A1.2)$$

La demande en puissance réactive de la part d'une charge peut conduire à un surdimensionnement des réseaux. Pour y remédier, des condensateurs (placés en batteries) sont installés près des éléments inductifs afin de leur fournir la puissance réactive dont ils ont besoin. La condition optimale est réalisée lorsque C est choisi de façon à ce que :

$$Q_C = Q_L \quad (A1.3)$$

III. TECHNOLOGIE DES CONDENSATEURS DE PUISSANCE :

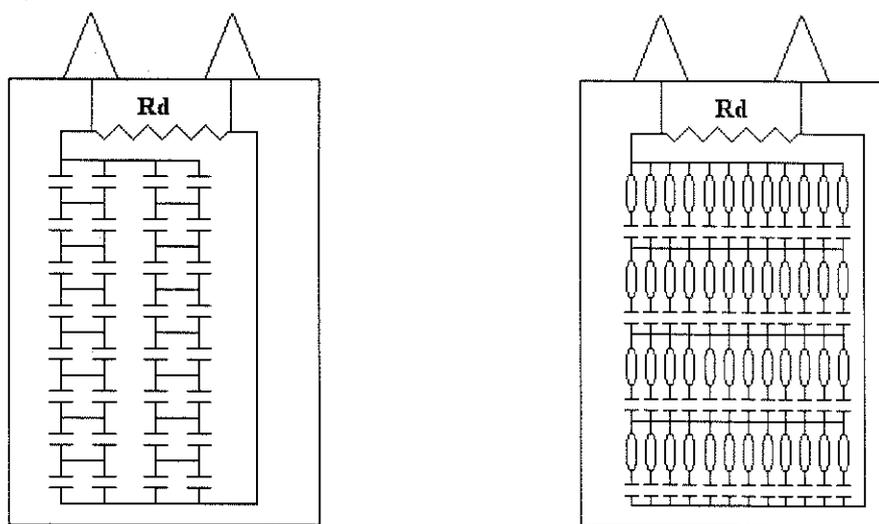
L'industrie des condensateurs de compensation de phase a connu ses premiers pas vers 1920. Mais depuis 40 ans, une importante mutation technologique s'y est opérée permettant des gains en gradients de service (multipliés par 6), en puissance réactive unitaire (multipliée par 25) et en puissance massique (multipliée par 11). Parallèlement, les pertes diélectriques de ces condensateurs ont été divisées par 35.

L'évolution technologique de ces condensateurs est rappelée dans le tableau qui suit (d'après [Han97]):

Années	Diélectriques	Puissance réactive unitaire kvar	Champ électrique V/ μ m	Tangente de l'angle de pertes $\tan\delta$ W/kvar	Masse kg
1950-1959	Papier/huile minérale	20	12	3,5	30
1960-1968	Papier/PCB ¹	30 à 50	16	2	40
1969-1974	Mixte ² /PCB	100	38	0,6	45
1975-1983	Mixte/liquides non chlorés	100 à 200	45	0,45	35 à 60
1984-1987	Mixte avec fusible interne*	200	45	0,45	60
1988-1993	Tout film avec fusible interne*	jusqu'à 400	60	0,1	65
1994-...	Tout film avec fusible interne*	jusqu'à 600	75	0,1	65

*Ces condensateurs peuvent être également fabriqués sans fusible interne et le liquide d'imprégnation est toujours non chloré.
 1 : PCB : polychlorobiphényl
 2 : Mixte : papier+film de polypropylène

IV. STRUCTURE DES CONDENSATEURS TOUT-FILM ACTUELS:



R_d résistance de décharge

a. disposition classique :

2 sections de 8 groupes en série de 2 éléments en parallèle

b. disposition à fusibles internes :

4 groupes en série de 12 éléments en parallèle

Figure 1. Schéma de la disposition interne d'un condensateur HTA, d'après [Han97]

Un condensateur est composé d'éléments disposés en groupes en série et/ou en parallèle (figure 1). Chaque élément est un enroulement aplati appelé galette.

L'enroulement est constitué d'armatures métalliques en Aluminium de 5 à 6 μm d'épaisseur séparées par 2 ou 3 films de polypropylène rugueux d'épaisseurs comprises entre 10 et 16 μm (figure 2).

Les armatures sont débordantes: une marge de 15 mm sépare l'extrémité de la feuille d'aluminium de celle du polypropylène, aux deux extrémités de la galette. Les extrémités des armatures sont repliées afin de réduire l'effet de pointe dans leur voisinage immédiat. Le condensateur est imprégné par un diélectrique liquide dégazé.

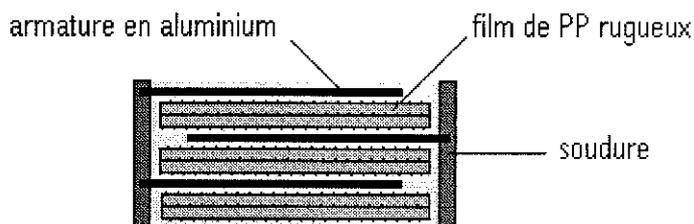


Figure 2. Structure d'un condensateur tout film imprégné

ANNEXE 2

Les réseaux de neurones

I. INTRODUCTION:

D'un point de vue topologique, dans un univers de la perception caractérisé par une forte dimensionnalité et un niveau de bruit important, la classification est une tâche complexe consistant à projeter un ensemble de stimuli dans un espace divisé en domaines séparés 2 à 2 par des hyperplans ou par des nappes. Cette tâche nécessite un codage qui permette l'extraction des caractéristiques significatives des objets à classer.

Cette fonction codage n'est accessible que par l'apprentissage. Par exemple cela peut se faire par association et comparaison d'un certain nombre d'exemples connus à l'avance avec des réponses correctes, ce qui permet de modifier progressivement les caractéristiques du système jusqu'à ce qu'un comportement global soit estimé suffisant.

La tâche globale se fait par l'interconnexion entre un ensemble d'objets élémentaires qui, pris individuellement, ne pourraient pas remplir cette fonction. C'est cette interconnexion qui constitue un réseau de neurone.

Les réseaux de neurones sont des ensembles d'opérateurs reliés entre eux par des connexions appelées synapses par analogie avec le fonctionnement élémentaire du système nerveux.

Chaque opérateur élémentaire est un neurone. Il comporte un nombre défini d'entrées et une sortie qui est l'image par une fonction non linéaire et dérivable, d'une combinaison linéaire des entrées:

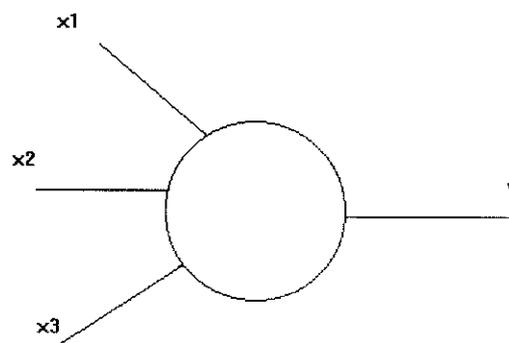


Figure 1. Représentation d'un neurone formel (x_1, x_2, x_3 : entrées, v : sortie)

Cette fonction de transfert est généralement:

- une tangente hyperbolique:

$$f(v) = th(av)$$

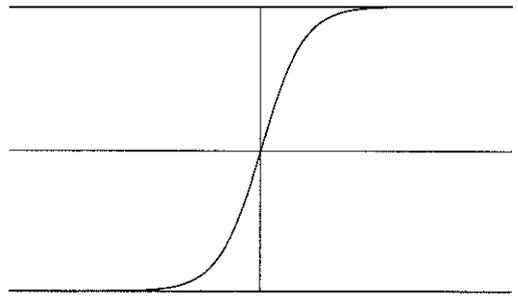


Figure 2. Représentation graphique de la fonction tangente hyperbolique

- ou une fonction sigmoïde:

$$f(v) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha v}}$$

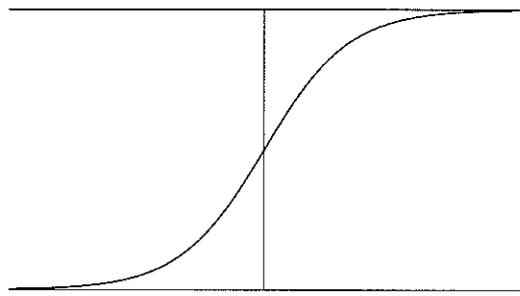


Figure 3. Représentation graphique de la fonction sigmoïde

L'utilisation d'un réseau de neurone nécessite l'existence d'un ensemble d'objets (base de données) dont on connaît la classification. Cette base est divisée en 2 sous ensembles : une base d'apprentissage qui sert à déterminer les poids des connexions et une base de test qui sert à valider le réseau.

II. DIFFERENTS TYPES DE RESEAUX DE NEURONES:

Il existe plusieurs catégories de réseaux de neurones classifieurs. Dans ce qui suit, nous présentons deux exemples de réseaux qui sont parmi les plus utilisés.

II. a. Le perceptron multicouche :

Ce type de réseau contient une couche de neurones d'entrée ou neurones perceptifs ou encore rétine, un nombre de couches cachées qui varie suivant la complexité du problème et une couche de neurones de sortie dont chacun correspond à une classe donnée. Par exemple, lorsque la sortie du $k^{\text{ième}}$ neurone de la couche de sortie vaut 1, cela signifie que l'objet à l'entrée a été classé dans la $k^{\text{ième}}$ catégorie.

Dans ce type de réseau, l'information circule dans un seul sens, de l'entrée vers la sortie en se propageant à travers les couches intermédiaires. Le $j^{\text{ème}}$ neurone de la couche i est

connecté à ses prédécesseurs de la couche $i-1$ par l'intermédiaire de synapses affectées de poids $w_{j,m}^{[i]}$, $1 \leq m \leq n$, n étant le nombre de neurones constituant la couche $i-1$.

Ainsi, la sortie d'un neurone j de la i^{eme} couche s'écrit de la manière suivante:

$$X_j^{[i]} = f \left(\sum_{m=1}^n w_{j,m}^{[i]} X_m^{[i-1]} \right) \quad (\text{A2-1})$$

f est par exemple la fonction sigmoïde, $X_m^{[i-1]}$ est la sortie du m^{eme} neurone de la couche $i-1$.

L'apprentissage est supervisé et se fait par la méthode dite de rétropropagation de l'erreur:

Tout d'abord un exemple (un ensemble de stimuli) dont on connaît la classification est présenté à l'entrée du réseau dans un ordre arbitraire. On calcule la différence entre la réponse obtenue et celle souhaitée et on modifie les connexions de la dernière couche de poids en conséquence par la méthode dite de descente du gradient. On applique ensuite cette méthode à l'avant dernière couche de poids et ainsi de suite; d'où le nom de rétropropagation de l'erreur.

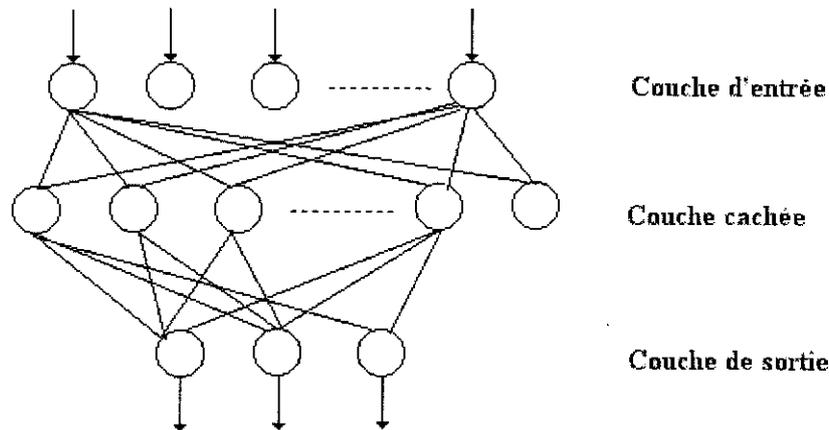


Figure 4. Perceptron multicouche (toutes les connexions ne sont pas représentées)

II. b. Réseau auto-organisateur de Kohonen:

Un tel réseau est formé de deux couches: une d'entrée et une de sortie où les neurones sont disposés en réseau bidimensionnel. Chaque neurone de sortie est directement connecté à l'ensemble des neurones de l'entrée par une connexion affectée d'un poids.

Ce type de réseau est capable d'identifier des similitudes entre les formes d'entrée. Ces similitudes se retrouvent dans la proximité géométrique des neurones de sortie correspondants. Ainsi, la présentation d'un stimulus sur les unités d'entrée permet de déterminer la cellule de sortie la plus proche.

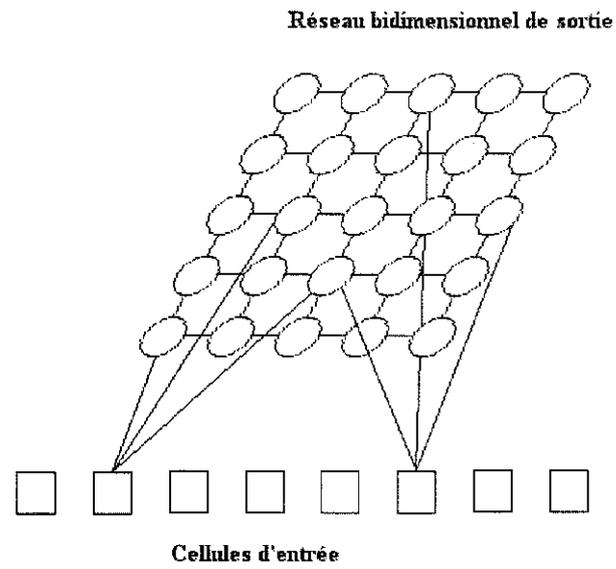


Figure 4. Schéma d'une carte de Kohonen bidimensionnelle d'après [Wei95]

ANNEXE 3

Calcul du facteur d'espace

I. ESTIMATION DU FACTEUR D'ESPACE :

Le condensateur sec peut être représenté par deux capacités en série : une couche de polypropylène et une couche d'air. Cette couche d'air sera remplie de liquide après imprégnation de la cellule.

Connaissant la valeur de la capacité de la cellule d'étude avant et après imprégnation, on peut déduire l'épaisseur de cette couche de liquide

On notera e_{pp} l'épaisseur de polypropylène, e_{air} celle de la couche d'air et e_l celle du liquide. C_{sec} est la capacité de la cellule avant imprégnation et C_{imp} est la capacité après imprégnation. C_{pp} , C_{air} , C_l sont respectivement les capacités du polypropylène, de l'air et du liquide seuls. ϵ_0 est la permittivité absolue du vide, ϵ_{pp} et ϵ_l sont respectivement les permittivités relatives du polypropylène et du liquide imprégnant.

La cellule est assimilée à un condensateur plan-plan (partie de la cellule où les deux armatures d'aluminium se croisent) dont l'aire est S.

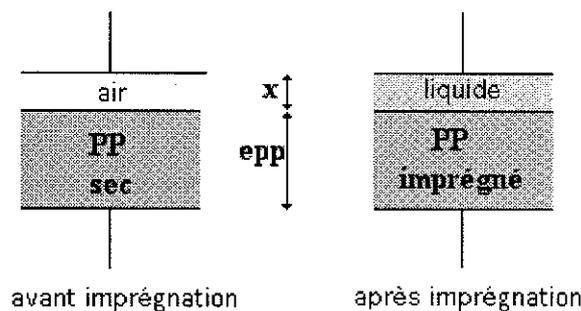


Figure 1. Représentation du condensateur avant et après imprégnation

La capacité de la cellule à sec s'écrit de la manière suivante :

$$C_{sec} = \frac{1}{\frac{1}{C_{pp}} + \frac{1}{C_{air}}}$$

$$\text{soit : } C_{sec} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_0 S} \left(\frac{e_{pp}}{\epsilon_{pp}} + e_{air} \right)}$$

De la même manière, la capacité de la cellule imprégnée s'exprime par :

$$C_{imp} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_0 S} \left(\frac{e_{pp}}{\epsilon_{pp}} + \frac{e_l}{\epsilon_l} \right)}$$

On en déduit que :

$$\frac{C_{imp}}{C_{sec}} = \frac{\frac{e_{pp}}{\epsilon_{pp}} + e_{air}}{\frac{e_{pp}}{\epsilon_{pp}} + \frac{e_l}{\epsilon_l}}$$

$$\text{Or } e_{air} = e_l = x$$

Il vient alors que :

$$x = \frac{\frac{e_{pp}}{\epsilon_{pp}} \left(1 - \frac{C_{imp}}{C_{sec}} \right)}{\frac{C_{imp}}{\epsilon_l C_{sec}} - 1} \quad (\text{A3-1})$$

II. APPLICATION NUMERIQUE :

Avec deux films de polypropylène de 15 μm d'épaisseur (13,6 μm d'épaisseur pondérale), le liquide imprégnant est le Jarylec, les capacités mesurées à sec et après imprégnation étant respectivement 80 et 90 pF, les permittivités relatives du polypropylène et du Jarylec sont respectivement : 2,2 et 2,66.

On obtient alors $x=2,4 \mu\text{m}$ à 12 % près.

ANNEXE 4

Détermination du volume gazeux formé par évaporation de liquide sous l'effet d'une décharge partielle

I. INTRODUCTION:

Soit un liquide diélectrique soumis à un champ électrique très intense. Une décharge a lieu dans un volume du liquide si celui-ci est soumis à un champ électrique supérieur à une valeur seuil.

Nous faisons l'hypothèse que l'impulsion de courant (ou la décharge partielle) correspondant à l'avalanche électronique dans le liquide apporte une énergie qV (q est la charge de la décharge et V est sa tension d'apparition) qui sert à chauffer un volume τ de liquide et à le vaporiser, formant ainsi une cavité gazeuse.

L'énergie nécessaire pour vaporiser une mole de liquide s'écrit:

$$E = \int_{T_{amb}}^{T_{eb}} c_p dT + L_v \quad (A4-1)$$

Pour calculer l'énergie E , on doit connaître les paramètres suivants :

T_b : température d'ébullition du liquide

C_p : capacité calorifique du liquide

L_v : chaleur latente de vaporisation du liquide

Les valeurs de T_b et L_v peuvent être obtenues dans les notices techniques des fabricants de liquide. On peut aussi calculer ces grandeurs en utilisant des formules décrites dans [Rei86] et qui se basent sur la décomposition d'une molécule complexe en fragments dont les paramètres thermodynamiques sont fournis.

II. CAS DU JARYLEC:

C'est un mélange de benzyltoluène (BT), de dibenzyltoluène (DBT) et de tribenzyltoluène (TBT) (voir paragraphe II. 3, chapitre I). La proportion de TBT est très faible, on peut alors considérer que le Jarylec contient 65% de BT et 35% de DBT.

II. a. Calcul des paramètres thermodynamiques du BT et du DBT :

II. a. 1. Cas du BT :

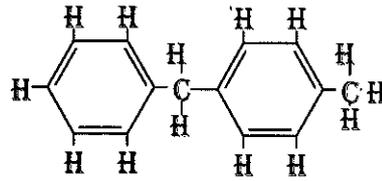


Figure 1. Molécule de BT

Nombre d'atomes dans une molécule de BT: 14 C et 14 H, soit au total $n_A=28$ atomes

Masse molaire du BT : $m(\text{BT})=14 \times m(\text{C}) + 14 \times m(\text{H}) = 14 \times 12 + 14 \times 1 = 182$

Calcul de T_c , P_c , V_c , T_b ,

Fragment	BT	DBT	T_b	T_c	P_c	V_c	ΔT_c^2
=CH—	9	12	26,73	0,0082	0,0011	41	0,00006724
=C<	3	5	31,01	0,0143	0,0008	32	0,00020449
-CH ₃	1	1	23,58	0,0141	-0,0012	65	0,00019881
>CH ₂	1	2	22,88	0,0189	0	56	0,00035721

Tableau 1. Caractéristiques thermodynamiques des différents fragments constituant les molécules de BT et de DBT, d'après [Rei86]

$$T_b = 198 + \sum \Delta_b (^{\circ}K) \text{ (page 25 de [Rei86])} \quad (\text{A4-2})$$

Soit alors : $T_b=198+380=578^{\circ}K$.

D'après ([Rei86], page 14, Lydersen method),

$$T_c = T_b \left[0,584 + 0,965 \sum \Delta T_c - (\sum \Delta T_c)^2 \right]^{-1} \quad (\text{A4-3})$$

$$\text{D'où : } T_c = 1,3761 T_b = 795,5^{\circ}K$$

En prenant $T_b=280^{\circ}C=553^{\circ}K$ (valeur donnée par [Ber]) on trouve $T_c=761^{\circ}K$

$P_c=(0,113+0,0032n_A-\Sigma\Delta P)^{-2}$ soit $P_c=27,3$ bars

$V_c=17,5+\Sigma\Delta V=603,5$ cm³/mole

Tableau récapitulatif pour le BT:

T_c	488 - 522 [°] C
P_c	27,3 bars
V_c	603,5 cm ³ /mole
T_b	280 - 305 [°] C

Tableau 2. Caractéristiques thermodynamiques du BT. La première valeur de T_b est celle donnée par [Ber], la seconde est calculée par la méthode de [Rei86]. La première (resp. seconde) valeur de T_c est calculée à l'aide de la première (resp. seconde) valeur de T_b .

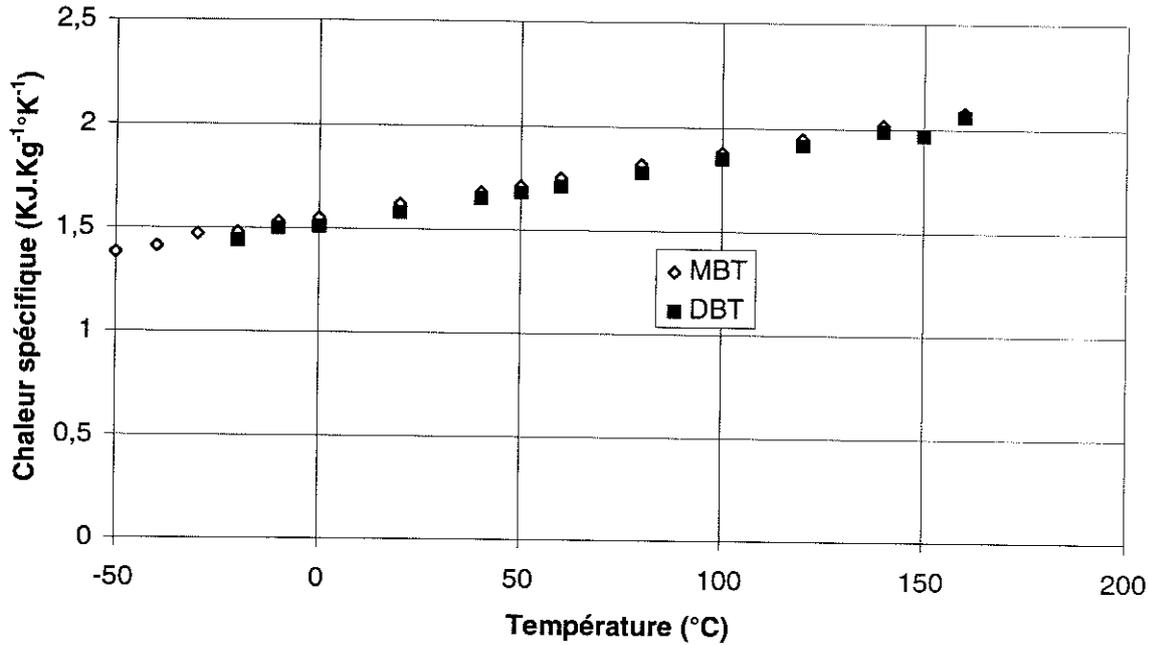


Figure 3. Chaleurs spécifiques du MBT et du DBT en fonction de la température, d'après [Ber]

On remarque que pour les deux composés, la température d'ébullition (respectivement 280 et 380°C) est supérieure à la borne supérieure de l'intervalle de température de la courbe ci-dessus. Ceci nous oblige à extrapoler les deux droites $C_p(T)$ afin de couvrir tout l'intervalle $[T_{amb}, T_{eb}]$:

Les expressions en fonction de la température des chaleurs spécifiques du BT et du DBT, extrapolées à partir de la courbe 3 sont les suivantes :

$$BT : c_p(T) = 0,0033T + 0,651 \text{ en KJ.Kg}^{-1}.\text{°K}^{-1} \quad (A4-7)$$

$$DBT : c_p(T) = 0,0033T + 0,615 \text{ en KJ.Kg}^{-1}.\text{°K}^{-1} \quad (A4-8)$$

On obtient alors l'énergie E nécessaire pour évaporer une mole de liquide. Les valeurs sont données dans le tableau ci-dessous :

	BT		DBT	
	$T_b=280^\circ\text{c}$	$T_b=305^\circ\text{c}$	$T_b=380^\circ\text{c}$	$T_b=470^\circ\text{c}$
E (KJ)	153,7	167,7	280	374,2

Tableau 5. Energies de vaporisation du BT et du DBT suivant la valeur de T_b (fournie par [Ber] ou calculée par la méthode de [Rei86])

II. d. Application numérique :

Détermination du rayon de la bulle (supposée sphérique) formée près du bord d'armature d'un condensateur tout-film imprégné de Jarylec, par une décharge du 1^{er} régime (voir chapitre III) :

Pour le BT comme pour le DBT, la formule A4-6 peut s'écrire de manière simplifiée comme suit:

$$\rho = \alpha q \frac{1}{3V^3} \quad (\text{A4-9})$$

V étant la valeur efficace de la tension appliquée en kV_{eff} , q la charge apparente en pC, ρ est en μm .

Les valeurs du coefficient α sont rassemblées dans le tableau suivant :

	T_b selon [Ber]	T_b calculée par la méthode de [Rei86]
BT	4,66	4,59
DBT	4,03	3,82

Tableau 6. Valeurs numériques du coefficient α de la formule A4-9, suivant la valeur de T_b (fournie par [Ber] ou calculée par la méthode de [Rei86])

exemple : Cas d'une cellule sans défaut avec 2 films de PP de $13,6 \mu\text{m}$ d'épaisseur, avec des armatures de $6 \mu\text{m}$ repliées. Au seuil du 1^{er} régime de décharges partielles, $q=0,2 \text{ pC}$ et $V=5,6 kV_{\text{eff}}$

Les valeurs en μm obtenues pour le rayon de la bulle sont données dans le tableau qui suit :

	T_b selon [Ber]	T_b calculée par la méthode de [Rei86]
BT	4,85	4,75
DBT	4,2	4

Lors du passage au second régime de décharges partielles, la tension appliquée est de $7,5 kV_{\text{eff}}$. En considérant une décharge de 1 pC , on obtient :

	T_b selon [Ber]	T_b calculée par la méthode de [Rei86]
BT	9,1	9
DBT	7,9	7,5

ANNEXE 5

Décharges dans une cellule sans défaut à armatures symétriques

Cette annexe est un complément au chapitre III, partie I (Cellule symétrique). Elle concerne les décharges enregistrées avec une cellule sans défaut à armatures symétriques.

I. EVOLUTION DES DECHARGES EN FONCTION DU TEMPS :

I. a. Tension d'apparition par décharge en fonction du temps :

Si à l'instant t_i une décharge q_i apparaît à la phase Φ_i de l'onde de tension alors $V_{inc}(q_i) = V\sqrt{2} \cdot \sin(\Phi_i)$, où V est la valeur efficace de la tension appliquée.

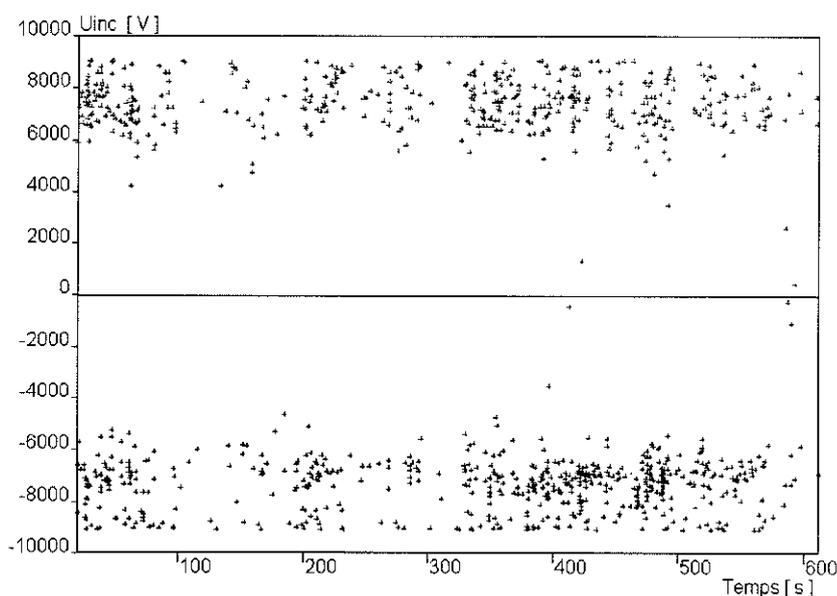


Figure 1. $V_{inc}(q_i)$ pour $V=6400 V_{eff}$

Il y a, comme le montre la figure 1, pour $V=6,4 kV_{eff}$, soit 15% au delà de la TADP, quasiment autant de décharges positives que de décharges négatives. La tension d'apparition par décharge est stable dans le temps.

I. b. Charge apparente des décharges partielles :

Soit $q(t)$ la charge apparente de la décharge mesurée par notre dispositif à l'instant t . Comme dans le cas des courbes $V_{inc}(q_i)$ (figure 1), l'axe des abscisses représente le temps.

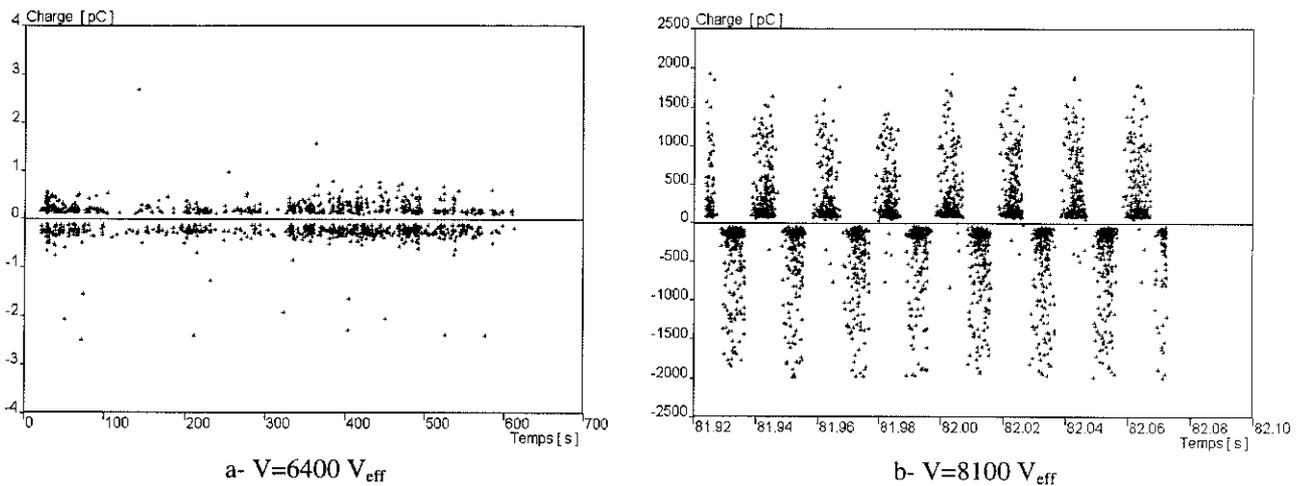


Figure 2. Evolution de la charge apparente des décharges en fonction du temps (a : 1^{er} régime, b : 2^{eme} régime)

La charge apparente est stable au cours de la durée de l'expérience lors du 1^{er} régime de décharges (figure 2-a). Lors du second régime, les décharges apparaissent par paquets (figure 2-b). Les décharges les plus intenses sont situées au milieu de chaque paquet soit au maximum de la tension.

II. DISTRIBUTIONS DES DECHARGES :

Les distributions suivantes correspondent à une subdivision de la phase en 512 classes.

II. a. Distribution du nombre de décharges par position en fonction de la phase : $n(\Phi)$

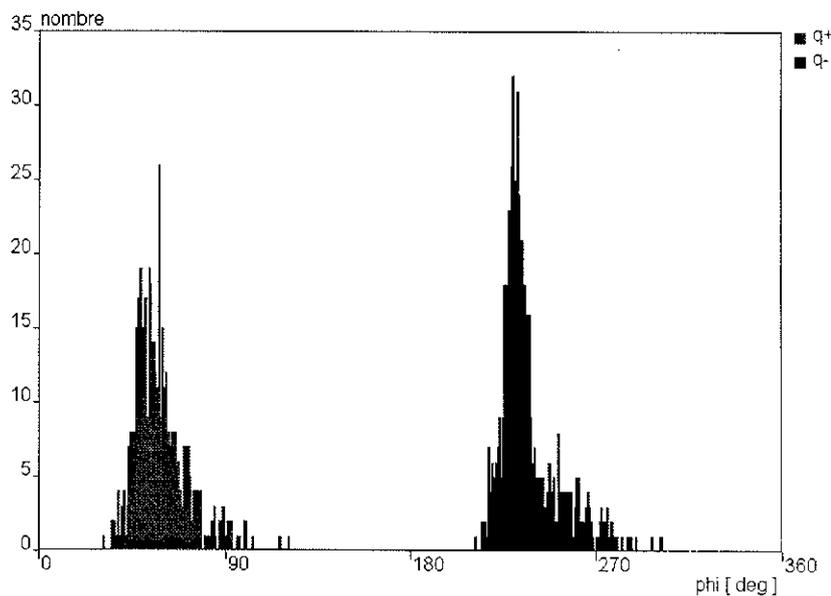


Figure 3. Distribution $n(\Phi)$ pour $V=6400 V_{eff}$

La figure 3 montre une symétrie entre décharges positives et négatives. Les distributions du 1^{er} régime de décharges commencent bien avant les sommets de la tension. Elles sont aiguës et ont des pics situés à 55° et 235° respectivement. Il y a un décalage avec la phase de la tension appliquée.

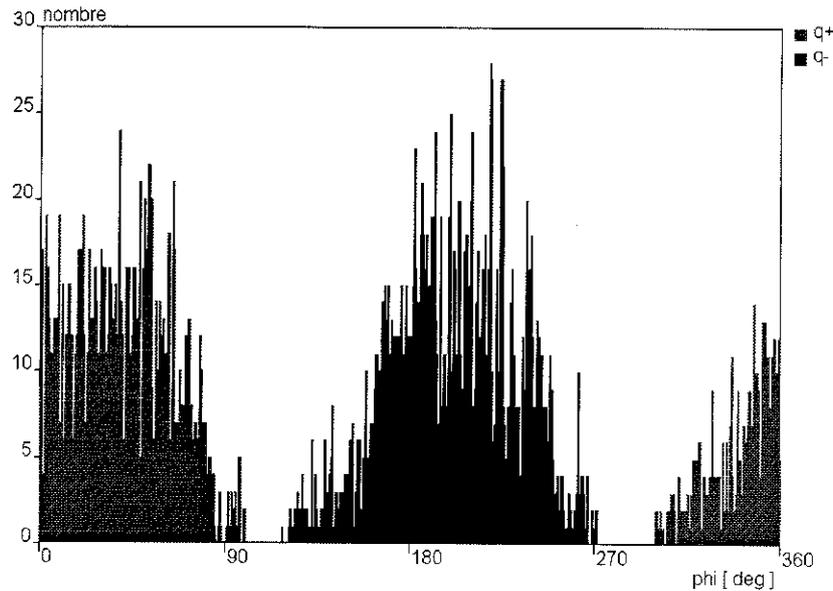


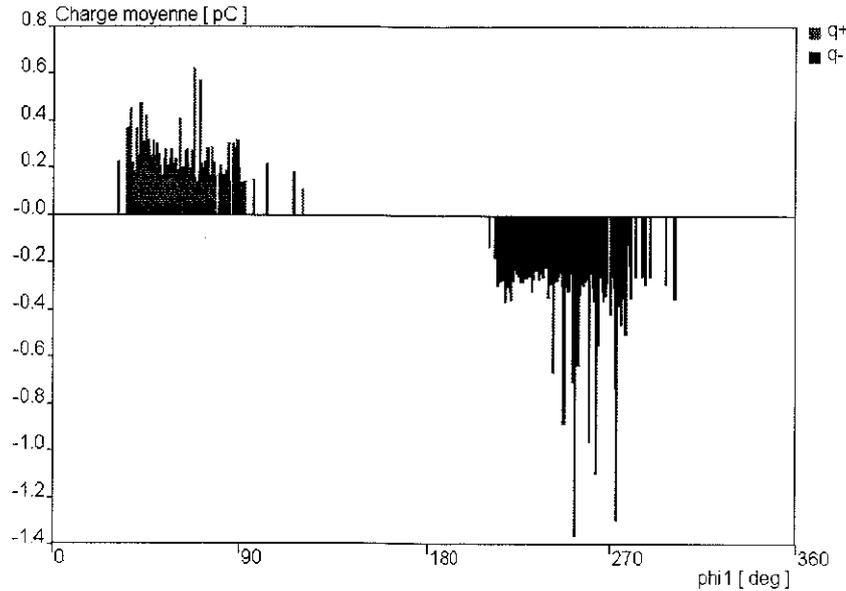
Figure 4. Distribution $n(\Phi)$ pour $V=8100 V_{eff}$

Lors du second régime de décharges, ce décalage s'accroît de manière importante comme le montre la figure 4, de sorte que des décharges positives sont générées en polarité négative et des décharges négatives sont initiées en polarité positive. Les distributions sont arrondies et ont des largeurs angulaires nettement plus importantes que lors du 1^{er} régime.

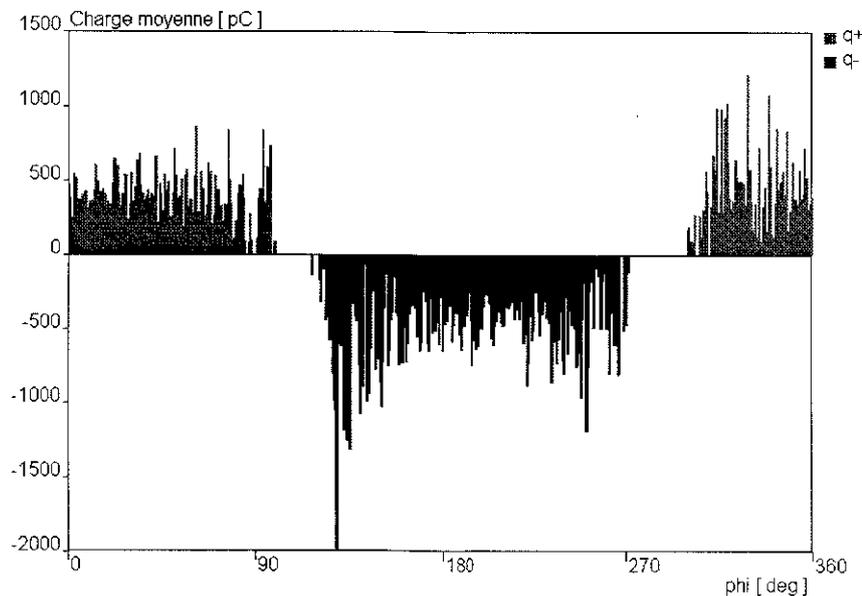
II. b. Distribution de la charge apparente moyenne par position en fonction de la phase : $Q_{moy}(\Phi)$

Nous retrouvons pour les distributions concernant la charge apparente moyenne le décalage par rapport à la phase de la tension déjà observé sur les distributions $n(\Phi)$

La distribution des décharges du 1^{er} régime est la superposition d'un grand nombre de décharges de même intensité (0,2 à 0,3 pC) et d'un certain nombre beaucoup plus faible, de décharges d'intensités plus élevées (supérieures à 1 pC parfois, figure 5).

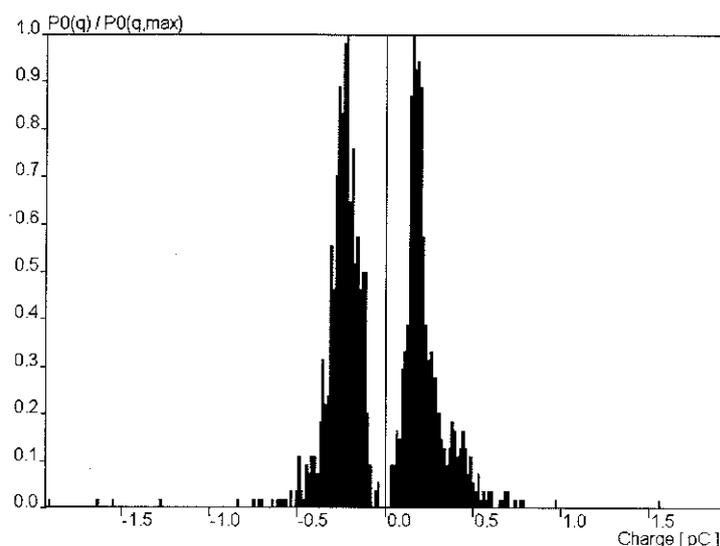
Figure 5. Distribution $Q_{\text{moy}}(\Phi)$ pour $V=6400 V_{\text{eff}}$

Les décharges positives et négatives du second régime de décharges représentées sur la figure 6 ont des distributions similaires. Elles sont très décalées par rapport aux sommets de la tension appliquée et ont des largeurs de phases qui recouvrent environ 5/6 de la période. Les charges enregistrées sont très intenses (quelques centaines de pC, avec quelques décharges de 1000 à 2000 pC).

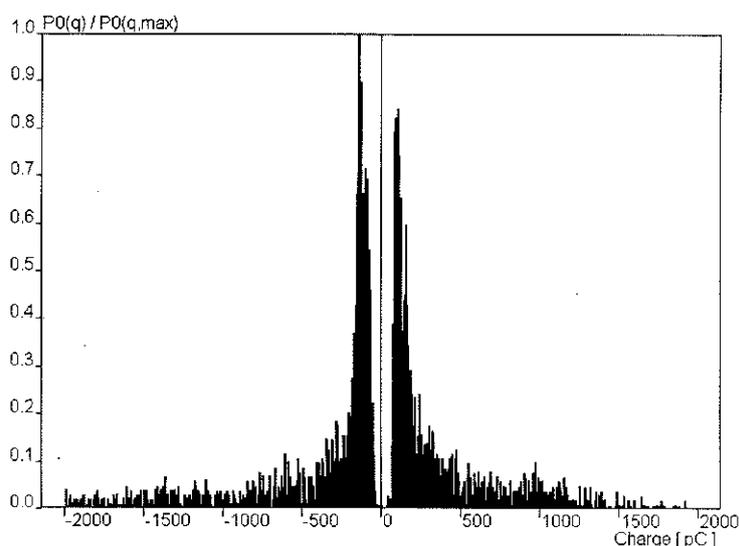
Figure 6. Distribution $Q_{\text{moy}}(\Phi)$ pour $V=8100 V_{\text{eff}}$

II. c. Distribution de la probabilité de la charge des décharges : $P_0(Q)$

Les distributions ci dessous obtenues avec des décharges partielles du 1^{er} régime (figure 7) et du 2^{eme} régime (figure 8) permettent de déterminer dans chaque cas, la valeur de la charge la plus probable parmi les décharges mesurées.

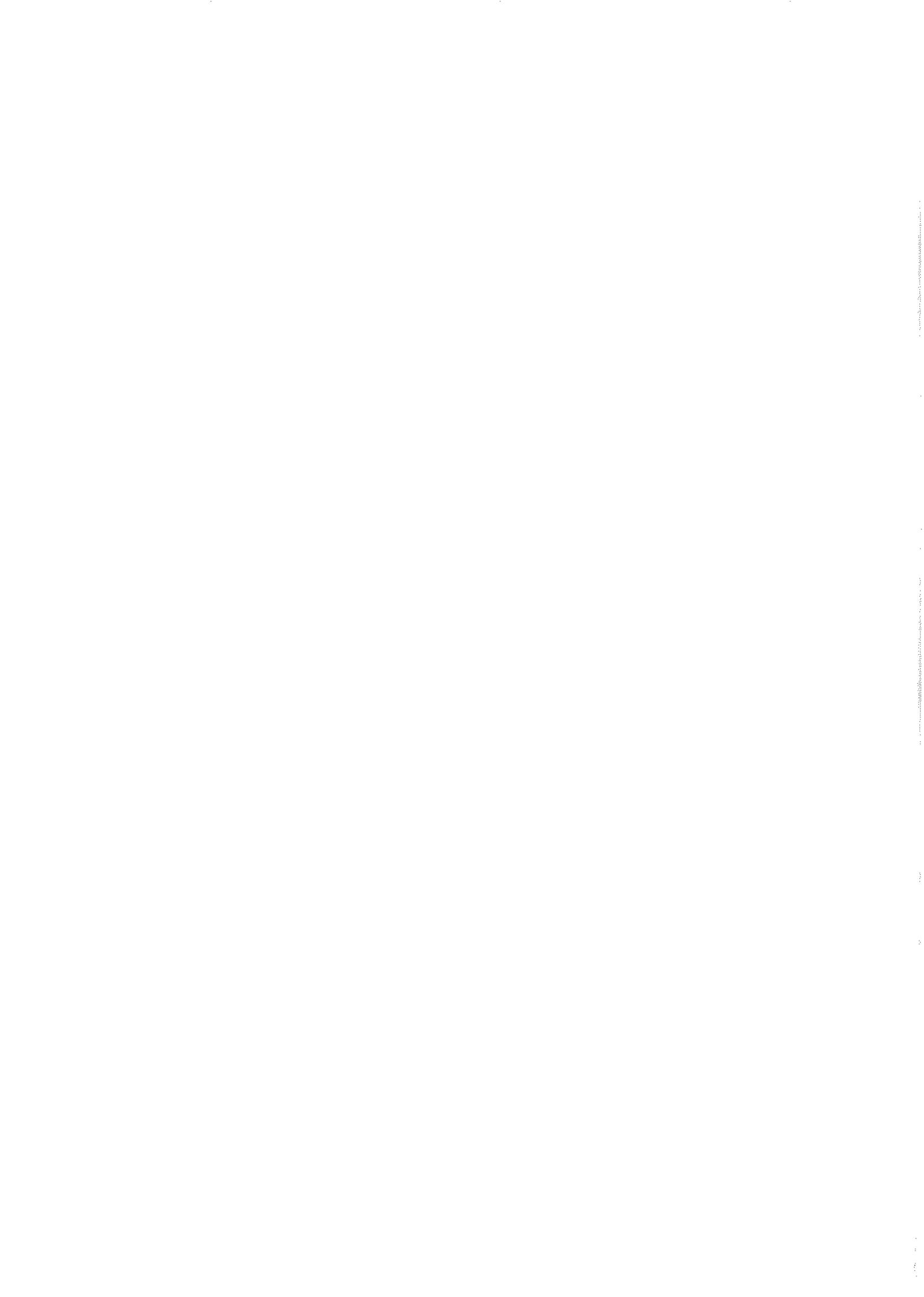
Figure 7. Distribution $P_0(Q)$ pour $V=6400 V_{eff}$

Pour les décharges du 1^{er} régime la charge la plus probable est de -0,2 pC comme le montre la figure 7.

Figure 8. Distribution $P_0(Q)$ pour $V=8100 V_{eff}$

La distribution correspondant aux décharges du second régime (figure 8) exhibe une similitude entre décharges positives et décharges négatives. Les charges les plus probables positives et négatives sont respectivement: 120 pC et -140 pC. Il existe cependant des décharges positives et négatives dont la charge est en valeur absolue de l'ordre de 2000 pC. Les deux distributions s'étendent vers des valeurs de charges plus importantes en valeur absolue de façon symétrique.

Ces trois types de distributions étudiées permettent donc par leur allure de distinguer entre les deux régimes de décharges partielles. La forme de certaines distributions se traduit par des valeurs particulières de certains coefficients statistiques (paragraphe I. 4, chapitre III).



RESUME

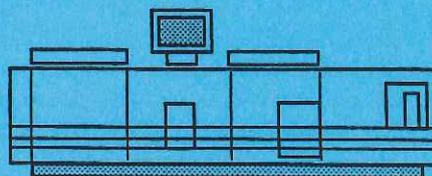
Les décharges partielles ont été mesurées sur des modèles de condensateurs tout-film dont le diélectrique est du polypropylène (PP) imprégné. Ces cellules ont été alimentées en haute tension alternative. L'influence de l'épaisseur de diélectrique ou des armatures ainsi que les effets de la température et du vieillissement ont été examinés. Les représentations $n(\Phi)$ et $Q_{\text{moy}}(\Phi)$ du nombre et de l'amplitude des décharges dans la phase de la tension alternative servent à caractériser la source de ces décharges : décharges en bord d'armature dans un modèle de condensateur sans défaut ou décharges générées par des défauts artificiellement introduits dans la cellule d'étude (défaut d'imprégnation, défaut de contact, cavité dans un film de PP, film de PP plié). Le but de cette caractérisation est la constitution d'une base de données qui servira à la reconnaissance de la source des décharges sur des appareils industriels et permettra d'estimer la durée de vie de ces appareils. Les tensions d'apparition et d'extinction des décharges partielles (TADP et TEDP), l'évolution des décharges en fonction du temps ou de la tension appliquée sont des éléments qui servent à la caractérisation des décharges. Cette tâche se fait également au moyen de paramètres calculés à partir des distributions $n(\Phi)$ et $Q_{\text{moy}}(\Phi)$. Ces paramètres peuvent être les moments d'ordre 3 et 4 ou bien les paramètres que nous avons introduits dans cette étude et qui sont les paramètres de position et le paramètre d'efficacité énergétique. Ces deux derniers paramètres sont les plus efficaces car ils permettent à eux seuls de différencier la plupart des cas étudiés.

ABSTRACT

Partial discharge measurements have been carried out on all-film capacitor models made of impregnated polypropylene (PP) and fed with a high alternating voltage. The influence of the dielectric and the electrode thickness as well as the temperature and aging effects have been pointed out. The representation of the number and the magnitude of discharges in the voltage phase ($n(\Phi)$ and $Q_{\text{moy}}(\Phi)$) allows a characterization of the discharge source : discharges located on the electrode edges in a defect-free capacitor or discharges induced by defects artificially introduced in the test cell (impregnation defect, contact defect, a cavity in a PP film, a folded PP film). The purpose of this characterization is to build a data base that enable us to recognize a discharge source on an industrial apparatus and hence to estimate the apparatus life time. This characterization task is full-filled by using the partial discharge inception and extinction voltages (PDIV and PDEV), the discharge evolution with time and applied voltage as well as some parameters calculated from the $n(\Phi)$ and $Q_{\text{moy}}(\Phi)$ distributions. These parameters are the 3rd and the 4th order moments or those we have introduced in this study which are the position parameters and the energy efficiency parameter. Our parameters are more useful because they allow a distinction between most of the cases we have studied.



Grenoble, février 1998



Imprimé sur "Xerox 5090",
au Service Reprographie du CNRS de Grenoble.

