

Caractérisation électrique d'un condensateur haute-tension sec

Par

Olatoundji George GNONHOUE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 29 NOVEMBRE 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Olatoundji George Gnonhoue, 2021



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Éric David, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Ioana Preda, codirectrice de mémoire
Département de génie électrique à la Haute école d'ingénierie de d'architecture de Fribourg

M. Simon Joncas, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Handy Fortin-Blanchette, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 22 NOVEMBRE 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur Éric David pour son implication et sa patience que j'ai grandement apprécié au cours de ma maîtrise. Je remercie également ma codirectrice Ioana Preda pour sa supervision et son apport à mon travail de recherche. Qu'il me soit permis de leur exprimer mes sincères sentiments de gratitude pour avoir encadré ce travail avec beaucoup de compétences, de sympathies, pour leur rigueur scientifique et leur disponibilité tout au long de ce travail.

Je remercie l'entreprise Condis pour avoir permis le développement de ce projet, et notamment Damien Frioud pour son investissement et sa disponibilité.

Je remercie tout particulièrement Amanda Velazquez-Salazar, qui a participé activement à ce travail de recherche, et au contact de qui j'ai beaucoup appris.

Du côté personnel, je souhaite exprimer mes sentiments de gratitude à tous les membres de ma famille pour leur soutien constant et leurs encouragements depuis le début de ce travail jusqu'à son aboutissement.

Caractérisation électrique d'un condensateur haute-tension sec

Olatoundji George GNONHOUE

RÉSUMÉ

Condis, l'un des leaders pour les condensateurs haute tension, fabrique annuellement 16500 produits par année. Depuis des décennies, la technologie de fabrication n'a pas évolué et exige plus de 60 % d'opérations manuelles. De plus, les condensateurs fabriqués utilisent des huiles synthétiques en tant que mur diélectrique. Ces huiles ont un effet néfaste sur l'environnement et les nouvelles réglementations écologiques pourraient interdire leur usage. Dès lors, une révolution technologique est requise afin d'offrir des condensateurs secs, sans huile, avec une flexibilité d'automatisation, une amélioration du délai de fabrication et surtout pouvant opérer de façon faible aux champs électriques typiques pour les condensateur HT (quelques dizaines de kV/mm). L'objectif général de ce travail consiste à caractériser électriquement les signatures de décharges partielles (DP) dans les condensateurs haute tension secs et à modéliser le phénomène des DP à l'intérieur de ces condensateurs. Afin d'atteindre cet objectif, la caractérisation électrique et diélectrique des condensateur haute tension sec a été réalisé afin d'évaluer les facteurs influençant l'apparition des défauts dans les condensateurs haute tension sec afin de faire des recommandations pour diminuer la présence des défauts dans ces condensateurs. La solution imaginée combine une partie du savoir-faire de Condis en ce qui concerne la fabrication de bobines minces et le savoir-faire de l'ETS pour la recherche d'une optimisation des processus et des matériaux. Ce nouveau procédé de fabrication a permis d'améliorer la technologie de fabrication des condensateurs haute tension. Ainsi les profils de DP ont été identifié dans les condensateurs haute tension sec, les solutions technologiques ont été proposé et interpréter afin de diminuer les DP dans les condensateurs haute tension sec et des recommandations ont été faite pour améliorer le processus de fabrication des condensateurs haute tension. Les théories existantes concernant les condensateurs haute tension ont été traité ainsi que les informations détaillées concernant les différentes sources possibles, les techniques de mesures des décharges partielles, les techniques d'imprégnation, ainsi que les différents imprégnant et les matériaux diélectriques ont aussi été présentés dans ce travail.

Mots-clés : condensateur sec, matériaux diélectriques, haute tension

Electrical characterization of a dry high voltage capacitor

Olatoundji George GNONHOUE

ABSTRACT

Condis, one of the leaders in high voltage capacitors, annually manufactures 16,500 products per year. For decades, manufacturing technology has not changed and requires more than 60% manual operations. Additionally, manufactured capacitors use synthetic oils as a dielectric wall. These oils have a detrimental effect on the environment and new ecological regulations could prohibit their use. Therefore, a technological revolution is required in order to offer dry capacitors, without oil, with flexibility of automation, an improvement in manufacturing time and above all being able to operate in a weak manner at the electric fields typical for HV capacitors (a few dozen of kV / mm). The general objective of this work is to electrically characterize the partial discharge (PD) signatures in high voltage dry capacitors and to model the phenomenon of PD inside these capacitors. In order to achieve this objective, the electrical and dielectric characterization of high voltage dry capacitors was carried out in order to evaluate the factors influencing the appearance of faults in high voltage dry capacitors in order to make recommendations to reduce the presence of faults in these capacitors. The imagined solution combines part of the know-how of Condis with regard to the manufacture of thin coils and the know-how of ETS for the search for an optimization of processes and materials. This new manufacturing process has improved the manufacturing technology of high voltage capacitors. Thus, PD profiles have been identified in high voltage dry capacitors, technological solutions have been proposed and interpreted in order to decrease PD in high voltage dry capacitors and recommendations have been made to improve the manufacturing process of high voltage capacitors. Existing theories regarding high voltage capacitors have been discussed as well as detailed information regarding the different possible sources, partial discharge measurement techniques, impregnation techniques, as well as different impregnants and dielectric materials have also been presented in this work.

Keywords: dry capacitor, dielectric materials, high voltage

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Conception de condensateurs à film haute tension	6
1.3 Condensateurs à électrodes métallisées	7
1.4 Condensateurs à feuille	12
1.5 Matériaux diélectriques utilisés dans les condensateurs haute tension.....	16
1.5.1 Matériaux diélectriques.....	16
1.5.2 Capacité électrique.....	20
1.5.3 Tangente de l'angle de perte	21
1.5.4 Rigidité diélectrique et claquage.....	23
1.6 Traitements de film polymère.....	27
1.7 Encapsulant.....	27
1.8 Mesure et analyse des décharges partielles (DP).....	30
CHAPITRE 2 CONCEPTION DES CONDENSATEURS SEC HAUTE TENSION	33
2.1 Conception des condensateurs sec haute tension.....	33
CHAPITRE 3 CARACTÉRISATION ÉLECTRIQUE ET DIÉLECTRIQUE DES CONDENSATEURS HAUTE-TENSION SEC	42
3.1 Étude de la rigidité diélectrique	42
3.1.1 Caractérisation électrique du film de polypropylène.....	43
3.1.2 Caractérisation électrique de la résine de 1,46 mm d'épaisseur	45
3.1.3 Caractérisation électrique des condensateurs VPI	48
3.2 Caractérisation diélectrique de la résine époxy	59
3.3 Mesure et analyse des décharges partielles (DP).....	64
3.4 Comparaison de deux technologies de condensateur : film traité corona et non.....	70
3.5 Identification des profils de décharge partielles par la méthode PRPD.....	72
CHAPITRE 4 DÉTERMINATION DES FACTEURS INFLUENÇANT L'APPARITION DES DÉCHARGES PARTIELLES.....	81
4.1 Influence du niveau de tension sur l'activité des DP	81
4.1.1 Cavité rectangulaire	81
4.2 Influence de la taille de la cavité sur l'activité des DP	86
4.2.1 Cavité rectangulaire	86
4.3 Influence de la permittivité sur l'activité des DP.....	90
4.3.1 Cavité rectangulaire	90
CHAPITRE 5 SEUIL D'APPARITION DES DÉCHARGES PARTIELLES (DP).....	95
5.1 Détermination théorique du seuil d'apparition des Décharges partielles (DP).....	95
5.2 Détermination expérimentale du seuil d'apparition des DP	98

CONCLUSION.....	101
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	103

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Histoire du développement des condensateurs5
Tableau 1.2	Comparaison des caractéristiques des condensateurs de puissance.....6
Tableau 1.3	Principaux articles de revue axés sur les condensateurs métallisés8
Tableau 1.4	Principaux articles sur les condensateurs à feuille.....14
Tableau 1.5	Résumé des caractéristiques générales des films polymères diélectriques26
Tableau 1.6	Vue d'ensemble des matériaux isolants thermodurcissables et élastomères.....29
Tableau 1.7	Vue d'ensemble des liquides isolants30
Tableau 2.1	Différentes technologies de condensateurs fabriqués40
Tableau 2.2	Comparaison de différentes technologies de condensateurs.....40
Tableau 3.1	Résine avec accélérateur ayant une épaisseur moyenne de 1,46 mm47
Tableau 3.2	Bobines imprégnées de résine.....51
Tableau 3.3	Bobines dans l'air avec ($e = 0,0381$ mm, $C = 54,1$ nF)54
Tableau 3.4	Bobines dans l'air avec $e = 0,0381$ mm, $C = 67,1$ nF56
Tableau 3.5	Charge apparente Q_{IEC} @ 40 kV/mm (pC) et à 60 Hz.....70
Tableau 3.6	Charge apparente Q_{IEC} @ 60 kV/mm (pC) et à 60 Hz.....70
Tableau 3.7	Charge apparente de DP à 40 kV/mm et à 60 Hz72
Tableau 3.8	Résultats des DP et la valeur de la capacité78
Tableau 3.9	Données statistique des DP à 40 kV/mm79
Tableau 3.10	Données statistique des DP à 60 kV/mm80
Tableau 5.1	Tension d'initiation des DP pour des échantillons présentant des défauts99

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Condensateur métallisé à une section.....9
Figure 1.2	Condensateur métallisé multi-section transversale10
Figure 1.3	Condensateur métallisé multi-section longitudinale10
Figure 1.4	Condensateurs métallisés empilés12
Figure 1.5	Condensateur métallisé bobiné.....12
Figure 1.6	Condensateur feuille/film multi-section15
Figure 1.7	Différents types de condensateurs à film/feuille15
Figure 1.8	Illustration de la polarisation d'un diélectrique17
Figure 1.9	Éléments du condensateur20
Figure 1.10	Diagramme du courant et de la tension22
Figure 1.11	Pertes diélectriques du PET22
Figure 1.12	Pertes diélectriques du polyéthylène basse densité (LDPE).....23
Figure 2.1	Processus de fabrication de la partie active d'un condensateur sec33
Figure 2.2	Partie active avec les connexions34
Figure 2.3	Vue de dessus du montage d'une bobine dans le moule de fabrication35
Figure 2.4	a) Séchage du condensateur, b) mélange de résine36
Figure 2.5	a) Étuve du condensateur et de la résine, b) dégazage de résine37
Figure 2.6	Cycle de polymérisation du mélange de résine38
Figure 2.7	Étapes successives de la fabrication d'un condensateur sec39
Figure 3.1	Banc d'essai des mesures de rigidité diélectrique du polypropylène44
Figure 3.2	Diagramme de Weibull avec intervalles de confiance à 90% du PPRc45
Figure 3.3	Résine époxy Hunstman avec accélérateur46

Figure 3.4	Diagramme de Weibull de la résine	48
Figure 3.5	Banc d'essai pour les mesures de claquage et de DP	49
Figure 3.6	Condensateurs imprégnés de résine.....	50
Figure 3.7	Diagramme de Weibull du condensateur imprégnés de résine	52
Figure 3.8	Condensateurs dans l'air.....	53
Figure 3.9	Diagramme de Weibull des condensateurs non imprégnés	55
Figure 3.10	Diagramme de Weibull des condensateurs non imprégnés (C = 67,1 nF).....	57
Figure 3.11	Point de claquage des condensateurs non imprégnés de résine époxy	58
Figure 3.12	Point de claquage des condensateurs imprégnés de résine époxy	58
Figure 3.13	Banc d'essai des mesures de spectroscopie et le porte échantillon	60
Figure 3.14	Principe de mesure en spectroscopie diélectrique	61
Figure 3.15	Tangente de l'angle de perte de la résine	62
Figure 3.16	Permittivité imaginaire de la résine	62
Figure 3.17	Permittivité réelle de la résine	63
Figure 3.18	Schéma de raccordement pour la mesure des DP.....	66
Figure 3.19	Histogramme des DP à 40 kV/mm des condensateurs imprégnés de résine	68
Figure 3.20	Histogramme des DP à 60 kV/mm des condensateurs imprégnés de résine	68
Figure 3.21	Histogramme des DP à 40 kV/mm des condensateurs non imprégnés	69
Figure 3.22	Histogramme des DP à 60 kV/mm des condensateurs dans l'air	70
Figure 3.23	Histogramme des décharges partielles à 40 kV/mm du condensateur PPR-3L.....	71
Figure 3.24	Histogramme des décharges partielles à 40 kV/mm du condensateur PPRc-3L	71

Figure 3.25	Micrographie d'un trou de 0,7 mm de diamètre et 12,7 μm de hauteur.....	74
Figure 3.26	Micrographie d'un trou allongé (cavité allongée) de 12,7 μm de hauteur.....	74
Figure 3.27	Histogrammes des DP pour l'échantillon avec une fissure allongée.....	75
Figure 3.28	Histogrammes des DP pour l'échantillon avec des cavités arrondies.....	76
Figure 4.1	Modèle purement capacitif ABC.....	82
Figure 4.2	Activité des décharges partielles pour une tension crête de 2,12 kV	84
Figure 4.3	Activité des décharges partielles pour une tension de 4 kV	85
Figure 4.4	Nombre de décharges partielles pour $d_c = 16 \mu\text{m}$	86
Figure 4.5	Nombre de décharges partielles pour $d_c = 19 \mu\text{m}$	87
Figure 4.6	Nombre de décharges partielles pour $d_c = 22 \mu\text{m}$	87
Figure 4.7	Nombre de décharges partielles pour $d_c = 25 \mu\text{m}$	88
Figure 4.8	Nombre de décharges partielles pour $d_c = 28 \mu\text{m}$	88
Figure 4.9	Nombre de décharges partielles pour $d_c = 31 \mu\text{m}$	89
Figure 4.10	Nombre de décharges partielles pour $d_c = 34 \mu\text{m}$	89
Figure 4.11	Nombre de décharges partielles pour $d_c = 37 \mu\text{m}$	90
Figure 4.12	Nombre de décharges partielles pour $\epsilon_b = 2,2$	91
Figure 4.13	Nombre de décharges partielles pour $\epsilon_b = 3$	91
Figure 4.14	Nombre de décharges partielles pour $\epsilon_b = 4$	92
Figure 5.1	Modèle purement capacitif ABC.....	96
Figure 5.2	Seuil d'apparition des DP en fonction de la taille de la cavité.....	97
Figure 5.3	banc d'essai pour la mesure de la tension d'initiation des DP	98
Figure 5.4	Condensateurs VPI utilisés pour la mesure de la tension d'initiation des DP	99

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

HVAC	High Voltage Alternating Current
HVDC	High Voltage Direct Current
DP	Décharges Partielles
UV	Ultra Violet
IEC	International Electrotechnical Commission
VPI	Vacuum Pressure Impregnation

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURES

kV	Kilovolt
T	Température
J	Joule
U	Tension
m	Mètre
MV	Mégavolt
nm	Nanomètre
Hz	Hertz
kHz	KiloHertz
Kvar	Kilovar
mm	Milimètre
μF	MicroFarads
nF	NanoFarads
pF	PicoFarads
°C	Celsius
Kg	Kilogramme
m³	Mètre cube
μm	Micromètre
pC	PicoCoulomb
s	Seconde
α	Alpha
β	Beta
S	Seconde

INTRODUCTION

Condis, l'un des leaders pour les condensateurs haute tension, fabrique en Suisse environ 16500 condensateurs par an. Depuis des décennies, la technologie n'a pas évolué. Les produits sont volumineux et massifs, conçus sur mesure selon les besoins des clients et exigent plus de 60 % d'opérations manuelles.

En général, les condensateurs employés dans les réseaux de distribution de l'énergie électrique à haute tension utilisent des huiles synthétiques diélectriques. Ces huiles ont un effet néfaste sur l'environnement et les nouvelles réglementations en vigueur dans le domaine de l'environnement pourraient interdire leur usage. Ainsi les clients de Condis (OEM, distributeurs d'énergie) par exemple exigent que leurs infrastructures soient prochainement exemptées de gaz SF₆ ainsi que d'huile. Ces deux éléments représentent actuellement des matériaux irremplaçables pour la fonctionnalité du condensateur. Dès lors, une révolution technologique est requise afin d'offrir des condensateurs "secs", soit sans huile.

Cependant, la technologie actuellement utilisée pour la fabrication des condensateurs haute-tension et très haute tension consiste en l'utilisation de bobines mises en série, formant ce que l'on appelle la partie active du condensateur. Le tout est imprégné dans une huile synthétique. Le mur diélectrique entre les feuillards d'aluminium est composé d'un diélectrique mixte papier/PP/papier, le papier ayant une bonne compatibilité avec l'huile d'imprégnation. Dans le développement d'une version sans huile de ce condensateur, la conception du mur isolant est à repenser afin de l'optimiser en fonction du milieu d'imprégnation, en gardant à l'esprit que ce mur doit opérer en service sous des champs électriques de quelques dizaines de kV/mm (à titre de comparaison, le champ électrique moyen dans les câbles extrudés du réseau de distribution 25 kV d'Hydro-Québec est de 2 kV/mm). Ainsi, Condis projette une fabrication en série de condensateurs selon un procédé d'imprégnation sous vide avec de la résine, au lieu de l'imprégnation avec de l'huile. Mise à part l'impact environnemental, ce changement permettra une flexibilité d'automatisation et l'amélioration du délai de fabrication. Ainsi Condis

deviendrait l'un des seuls fabricants qui propose des condensateurs haute tension secs, pourvus d'une conception électrique innovante, prêts à équiper les sous-stations électriques de demain. La solution imaginée en collaboration avec l'ETS combine une partie du savoir-faire de Condis en ce qui concerne la fabrication de bobines minces et le savoir-faire de l'ETS pour la recherche d'une optimisation des processus et des matériaux. Ce nouveau procédé de fabrication permettra d'obtenir des sous-unités de condensateurs, qui doivent être conçues, testées et validées dès que cette fabrication sera maîtrisée. Une étape d'assemblage innovante devra également être finalisée et validée.

L'objectif général du projet consiste à caractériser électriquement les signatures de décharges partielles (DP) dans les condensateurs haute tension secs et à modéliser le phénomène des DP à l'intérieur de ces condensateurs.

De façon plus spécifique, les objectifs principaux de ce présent projet sont de: identifier les profils de DP dans les condensateurs haute tension sec, proposer des solutions technologiques pour diminuer les DP dans les condensateurs haute tension sec, interpréter les profils de DP dans les condensateurs haute tension sec et à faire des recommandations pour améliorer le processus de fabrication des condensateurs haute tension.

5 chapitres constituent ce mémoire. Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique. Ce chapitre aborde les théories existantes concernant les condensateurs haute tension, les études antérieures qui ont traité des condensateurs films, les informations détaillées concernant les différentes sources possibles des décharges partielles, les techniques de mesures des décharges partielles, les techniques d'imprégnation ainsi que les différents imprégnant et les matériaux diélectriques. Le deuxième chapitre présente le processus de fabrication des condensateurs haute-tension secs. Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus sur la caractérisation électrique et diélectrique des condensateurs haute-tension secs. Les résultats sur les facteurs influençant l'apparition des DP sont présentés dans le chapitre quatre et les résultats expérimentaux sur le seuil d'apparition des décharges partielles (DP) sont présentés au chapitre cinq.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Avec l'expansion des réseaux électriques, les équipements électriques doivent fonctionner à haute et ultra haute tension, ce qui entraîne la nécessité de développer des équipements électriques capables de résister à ces niveaux de tension pendant de longues périodes. Parmi ces éléments, nous pouvons trouver les condensateurs haute tension qui sont des composants clés pour les disjoncteurs, les dispositifs de surveillance et de protection. Ils sont des éléments importants utilisés pour améliorer l'efficacité et la fiabilité du réseau. Les étapes de fabrication des condensateurs haute tension nécessitent l'utilisation de films, des huiles diélectriques, des gaz ou des résines polymériques et ces matériaux jouent un rôle majeur dans la longévité de ces composants. Ces films sont utilisés dans l'industrie électrique en raison de leurs bonnes propriétés électriques et mécaniques, ainsi que de leur bonne adhérence. L'objectif de ce chapitre est de présenter différentes technologies utilisées dans la fabrication de condensateurs haute tension ainsi qu'une revue des différents matériaux utilisés pour fabriquer des condensateurs à film haute tension.

1.1 Introduction

Les condensateurs haute tension à film ou métallisés sont des composants importants pour les réseaux et certains équipements électriques (disjoncteurs, systèmes de mesure, ...). Les matériaux diélectriques utilisés dans ces condensateurs jouent un rôle clé dans la performance de ces condensateurs. Ils sont utilisés dans le transport, la répartition, la distribution de l'énergie électrique haute tension, le couplage ou les diviseurs de tension capacitifs, dans les sous-stations électriques, les disjoncteurs, les dispositifs de surveillance et de protection pour améliorer l'efficacité et la fiabilité du réseau. Imprégnés soit de gaz ou d'huile, ils peuvent être classés en six différentes catégories, à savoir: condensateurs haute puissance, condensateurs haute tension, condensateurs de stockage d'énergie, condensateurs de démarrage, condensateurs de filtrage et condensateurs de décharge (W. J Sarjeant, 1989). Une catégorie particulière, les condensateurs utilisés dans les applications haute tension, présente un intérêt

particulier étant donné leurs rôles clés dans l'amélioration de l'efficacité du réseau en stabilisant les niveaux de tension. Les matériaux diélectriques utilisés pour ces condensateurs jouent un rôle clé dans leurs performances et leur fiabilité à long terme. Bien qu'avant les années 1970, le papier kraft imprégné était le principal matériau diélectrique du condensateur, généralement utilisé en combinaison avec de l'huile minérale ou du diphénol polychloré (PCB) comme liquide d'imprégnation. De nos jours, les condensateurs sont souvent fabriqués à l'aide de films polymères. En raison de leur faible facteur de dissipation, de leur rigidité diélectrique élevée, de leur bonne stabilité et de leur grande disponibilité, les films polymères ont progressivement remplacé le papier kraft utilisé dans les condensateurs. Le passage du papier au film polymère a également raccourci le processus de production des condensateurs en réduisant le temps de séchage nécessaire avant l'imprégnation (Boggs, Ho, & Jow, 2010; Hantouche, 1996; Novák, Popelka, Chodák, & Sedláčik, 2011; Qi, Petersson, & Liu, 2014). De plus, les technologies de fabrication de condensateurs ont évolué au fil du temps, tout comme la technologie des polymères. Ainsi, les condensateurs à film ont été fabriqués en utilisant des films de polyéthylène (PE), de polystyrène (PS), de polytétrafluoroéthylène (PTFE), de polyéthylène téréphtalate (PET) et de polycarbonate (PC) et, plus récemment, de polypropylène à orientation biaxiale (BOPP), le choix actuel pour les condensateurs utilisés dans les applications haute tension (Huan et al., 2016; J. G. C Samuel, G. Lucas, M. Fu, P. J. Howard, & S Lafon-Placette, 2012).

Le tableau 1.1 présente l'historique du développement des condensateurs.

Tableau 1.1 Histoire du développement des condensateurs
Adapté de Kalapat & Amornsakchai (2012)

Condensateurs	Années
L'eau dans le pot de Leyde	1746
Feuille de verre-métal de Franklin	1750
Papier	1876
Condensateur électrolytique	1887
Papier ciré - feuille métallique	1876
Condensateur auto-cicatrisant	1900
Mica	1909
Condensateur électrolytique enroulé	1927
Laque sur papier	la Seconde Guerre mondiale
Films polymères	À partir de 1954

Le tableau 1.2 montre l'évolution dans le temps des différents condensateurs de puissance ainsi que leurs caractéristiques électriques et diélectriques.

Tableau 1.2 Comparaison des caractéristiques des condensateurs de puissance
Adapté de Hantouche (1996)

Années	Technologies de fabrication	Puissance réactive (kVAR)	Champ électrique d'opération (V/μm)	Facteur de dissipation (%)
1950-1959	papier/huile minérale	20	12	3,5
1960-1968	papier/PCB	30 à 50	16	2
1969-1974	mixte/PCB	100	38	0,6
1975-1983	mixte/liquides non chlorée	100 à 200	45	0,45
1984-1987	mixtes/avec fusible interne	200	45	0,45
1988-1993	tout film avec fusible interne	jusqu'à 400	60	0,1
1994-1996	tout film avec fusible interne	jusqu'à 600	75	0,1

1.2 Conception de condensateurs à film haute tension

Les condensateurs à film sont fabriqués sous la forme d'un enroulement sous une machine d'enroulement de condensateur ou un empilement du film diélectrique. Ces deux technologies

de fabrication sont appelées: technologie bobinée et empilés (Reuter, Jr., & Allen, 1991; W. J. Sarjeant, Zirnheld, & MacDougall, 1998). Parmi ceux-ci, on peut différencier quatre types de condensateurs à film, à savoir: les condensateurs à diélectriques mixtes, tout papier, tout film et les condensateurs à film métallisé (Bramouille, 1998). De plus, selon le choix des électrodes, on peut avoir des condensateurs sous deux formes: des condensateurs à armature diélectrique et des condensateurs métallisés. Les condensateurs à armatures sont utilisés pour les applications à très fort courant et les condensateurs à film métallisé pour les applications à faible courant (Boggs et al., 2010). Les condensateurs à diélectriques mixtes se composent d'une feuille de papier utilisée en conjonction avec des films polymères et imprégnée d'un diélectrique liquide non chloré, tandis que tous les condensateurs à film utilisent uniquement des films polymères également imprégnés d'un diélectrique liquide non chloré. Tous les condensateurs à film métallisé sont constitués d'une couche de film métallisé et ils peuvent être ou non imprégnés d'un diélectrique liquide ou gazeux (Shete & Thorat, 2013). Les technologies couramment utilisées seront détaillées plus en détail dans cette section.

1.3 Condensateurs à électrodes métallisées

La première étape de la construction d'un condensateur à film métallisé est le dépôt physique en phase vapeur sous vide d'une couche très mince (10 à 100 nm) de métal tel que l'aluminium, de zinc ou de zinc-aluminium d'un côté (évaporé à la surface) d'un rouleau de film polymère (Reuter et al., 1991). Parfois, de petites quantités d'autres métaux alliés sont ajoutés pour éviter la corrosion. Il existe cinq principaux types de construction de condensateurs métallisés, à savoir: conception de film métallisé sec (figure 1.1), conception de film métallisé imprégné de liquide / imprégné de gaz, papier cellulosique, conception de film polymère métallisé imprégné de liquide (diélectrique mixte ou tout film) et conception de film métallisé empilé (figure 1.4). L'enroulement des condensateurs métallisés est réalisé en enroulant deux feuilles du film métallisé sur un noyau cylindrique dur et isolant (figure 1.5). Au cours du processus de fabrication, les rouleaux sont enroulés aussi étroitement que possible pour éviter la formation de vacuoles ou de cavités d'air (Reed & Cichanowski, 1994). Le tableau 1.3 résume les

principales références bibliographiques qui se concentrent sur la technologie des condensateurs métallisés.

Tableau 1.3 Principaux articles de revue axés sur les condensateurs métallisés

Technologie	Condensateur métallisé empilé simple et double	Condensateur métallisé enroulé	Film métallisé multisection
Références	(Caliari et al., 2013; Clelland & Price, 2011; Kerrigan, 2011; Y. Yoshida & M. Nishimatsu, 1986)	(Boggs et al., 2010; Clelland & Price, 2011; Y. Yoshida & M. Nishimatsu, 1986)	(Anderson, 1996; Boggs et al., 2010; Qin & Boggs, 2010b)

L'avantage des condensateurs métallisés bobinés à film métallique est qu'ils prennent deux à trois fois moins de place que ceux portant des armatures et, en plus, ils présentent un comportement d'auto-cicatrisation. L'effet d'auto-cicatrisation peut s'expliquer comme suit: en cas de défaut du matériau diélectrique, l'énergie dégagée par la décharge est généralement suffisante pour vaporiser la métallisation autour du défaut et donc l'isoler électriquement. Le condensateur perd une partie de sa capacité mais retrouve son isolement et continue de fonctionner. Les connexions sont réalisées par métallisation selon la technique du shooping (figure 1.4) qui consiste à déposer un métal fondu sur les deux faces des condensateurs (Reuter et al., 1991; W. J. Sarjeant et al., 1998). Le shooping est réalisé par projection de métal, généralement du zinc ou d'un alliage de zinc, afin de se connecter à la métallisation du film (Huan et al., 2016).

Selon (Boggs et al., 2010; Shete & Thorat, 2013), il est recommandé qu'avant la métallisation, le film soit traité avec un traitement de surface corona afin de faciliter l'adhérence de ce dernier à la métallisation (cependant cette action n'est pas obligatoire). Après ce traitement, le film est métallisé dans un métalliseur sous vide à haute vitesse. Ceci est généralement suivi de l'application d'une tension supérieure à la tension nominale afin de garantir que tous les défauts créés lors de la fabrication sont supprimés de l'enroulement. Cela peut entraîner une légère

diminution de la capacité du condensateur, mais après cette opération, le condensateur restera dans les spécifications. Une limitation connue dans le processus de fabrication vient du choix des connexions, car elles sont le point faible des condensateurs à film métallisé. De plus, les deux films doivent chacun avoir une marge pour éviter un court-circuit entre les électrodes (Reuter et al., 1991). Une distinction est faite entre les condensateurs métallisés enroulés avec une seule section et ceux à multi-sections (figures 1.1 et 1.2). Les figures 1.1 et 1.2 présentent la géométrie d'un condensateur métallisé à une section et celle d'un condensateur métallisé multi-sections.

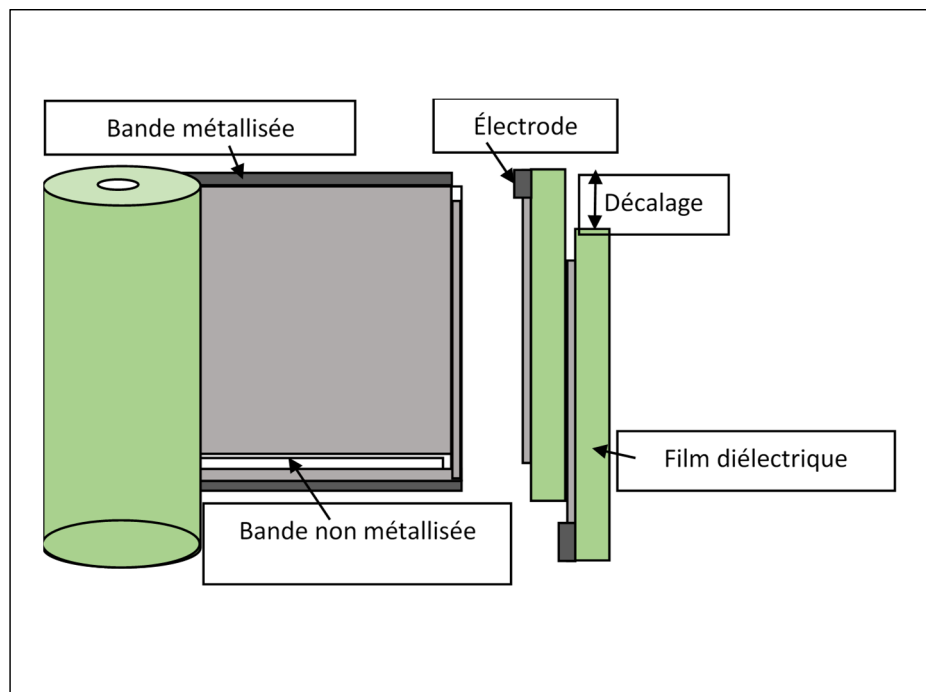


Figure 1.1 Condensateur métallisé à une section

Des bobines de film métallisé de plusieurs sections peuvent être réalisées dans la même bobine. Dans ce cas, les sections sont transversales ou longitudinales.

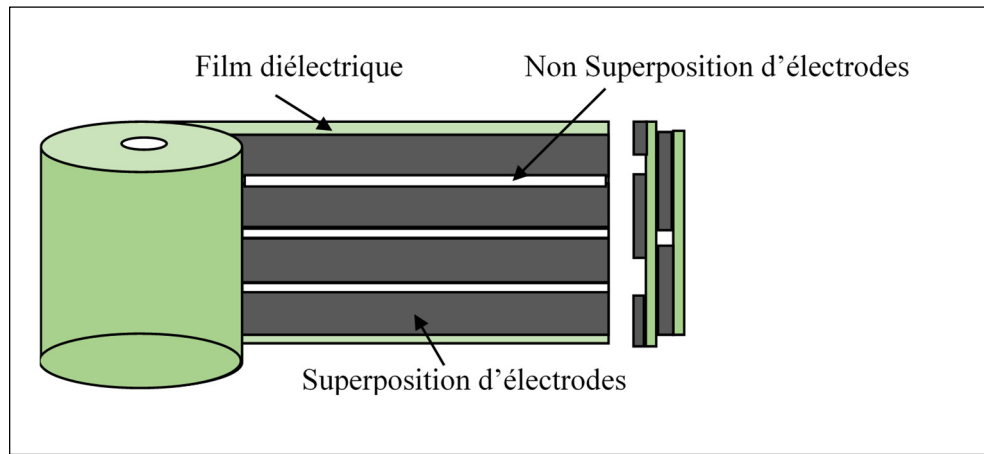


Figure 1.2 Condensateur métallisé multi-section transversale
Adaptée de Qin & Boggs (2010b)

Le principal avantage des condensateurs métallisés multi-section (figures 1.2 et 1.3) vient de l'abaissement des valeurs d'inductance et de résistance de l'enroulement (Qin & Boggs, 2010b). La figure 1.3 montre la configuration du condensateur métallisé multi-section longitudinale et l'agencement de la métallisation sur le film diélectrique.

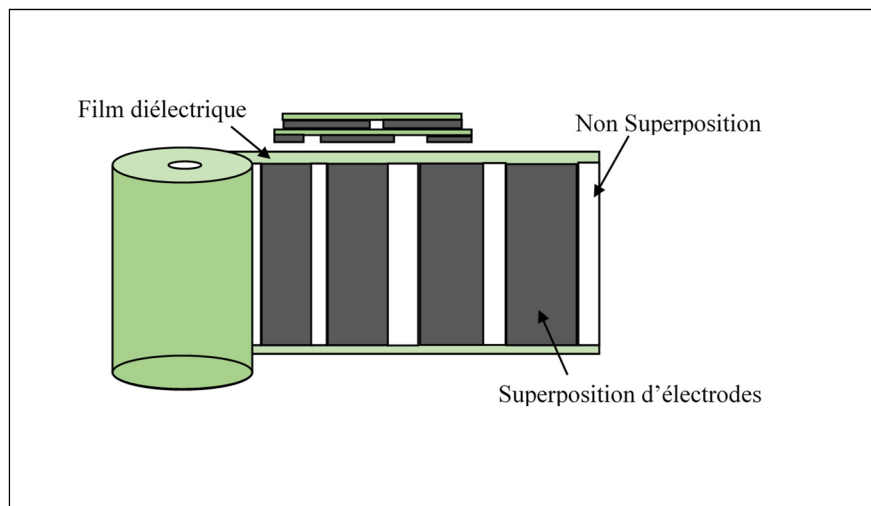


Figure 1.3 Condensateur métallisé multi-section longitudinale

Pour fabriquer les connexions des condensateurs métallisés longitudinaux multi-sections, des pattes sont insérées au centre du condensateur et sur le bord extérieur pour entrer en contact avec les première et dernière sections de l'enroulement (Boggs et al., 2010).

Une autre manière d'améliorer les performances d'un condensateur à film métallisé consiste à utiliser des couches diélectriques mixtes, c'est-à-dire du papier et un film rugueux. Dans ce cas, deux couches de papier sont métallisées sur une face et un film est empilé entre les deux couches de papier. Pour cet assemblage, il n'est pas nécessaire de métalliser le film. Le papier pourrait avoir une surface rugueuse qui présente l'avantage de permettre facilement à l'imprégnant liquide de pénétrer et de remplir l'espace entre film / papier et papier / électrode. Le film peut également avoir une surface rugueuse mais l'utilisation d'un film polymère ayant une surface rugueuse n'est pas obligatoire pour la fabrication d'un condensateur à film (Reed & Cichanowski, 1994).

Les condensateurs métallisés à film empilé sont constitués d'un empilement de condensateurs élémentaires connectés en parallèle (W. J. Sarjeant et al., 1998). Cet assemblage particulier convient aux applications nécessitant un bon compactage. La technique de fabrication des condensateurs à couches empilées (figure 1.4) est la même que celle des condensateurs bobinés (figure 1.5) mais dans le cas des condensateurs métallisés, deux films isolants avec métallisation (couche d'aluminium de 20 à 30 nm d'épaisseur) sont utilisés alors que, dans le cas des condensateurs bobinés et comme le montre la figure 1.5, l'ensemble film-électrode métallisé est enroulé sur une roue d'environ 80 cm de diamètre (Reuter et al., 1991). Les figures 1.4 et 1.5 montrent respectivement la configuration d'un condensateur métallisé empilé et bobiné. Ils présentent les couches métallisées, le film diélectrique et le lieu de création des connexions électriques (shoopage).

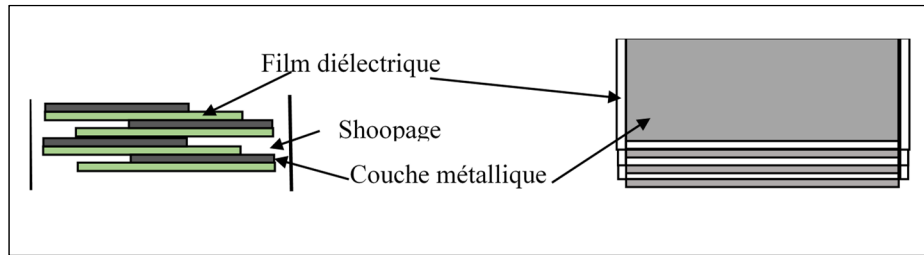


Figure 1.4 Condensateurs métallisés empilés

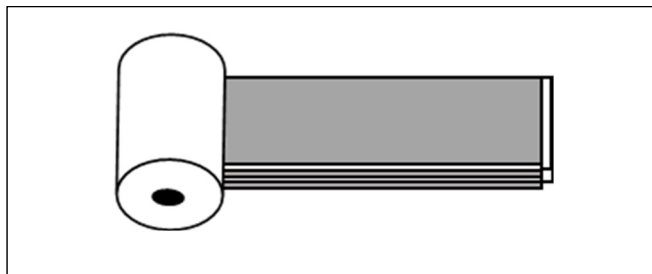


Figure 1.5 Condensateur métallisé bobiné

1.4 Condensateurs à feuille

Comme le montre la figure 1.7, les condensateurs à feuille sont constitués de deux films métalliques minces (aluminium ou zinc), d'une épaisseur de 5 à 6 μm , séparés par un milieu isolant et imprégnés ou non d'un diélectrique liquide. L'enroulement des électrodes et des films forment la bobine. L'électrode en aluminium doit être parfaitement propre; en particulier, un traitement adéquat doit éliminer tous les produits lubrifiants utilisés lors du laminage. De plus, il doit présenter une bonne régularité, une résistance mécanique satisfaisante et ne présenter aucun pli ni déchirure (Shete & Thorat, 2013). Les connexions des condensateurs à feuille bobinée peuvent être réalisées de deux manières: soit en insérant plusieurs pattes métalliques au contact de chaque armature, soit en faisant saillie l'armature en faisant dépasser chaque armature à travers le matériau isolant puis les connexions sont soudées (Shete & Thorat, 2013).

Après fabrication des condensateurs par la technique feuille/film, ils sont soumis à un traitement de séchage pour éliminer l'humidité présente dans ces derniers. Le séchage est suivi de l'encapsulation du condensateur. L'encapsulation peut être séparée en plusieurs étapes: préparation de la résine ou de l'huile, dégazage, transfert et enfin réticulation, lorsqu'une résine ou un polymère est utilisé.

Lors de la préparation du support d'encapsulation, il faut veiller à éviter l'introduction de quantités excessives d'air qui devront être extraites dans les étapes suivantes. Une solution serait d'utiliser un mélangeur automatique qui permettra non seulement de mélanger la résine et les différents produits dans les proportions appropriées, mais également de ne pas y introduire d'air. Ainsi, les récipients utilisés pour la préparation de la résine doivent impérativement rester fermés lorsqu'ils ne sont pas utilisés, afin d'éviter toute pénétration d'humidité. Avant utilisation, la résine est dégazée sous vide pour éliminer les bulles d'air du liquide diélectrique étant donné que les bulles d'air résiduelles sont susceptibles de présenter des décharges partielles pouvant entraîner une réduction de la tenue en tension et un vieillissement prématuré du condensateur (Keyrouz, 2011).

Il existe plusieurs configurations de condensateurs film / feuille tels que le condensateur feuille / film enroulé, le condensateur feuille / film empilé, la combinaison hybride film / feuille métallisée, les condensateurs à languette insérée et le condensateur film/feuille multi-section. Le tableau 1.4 présente différentes technologies et les principaux articles de synthèse axés sur chaque technologie de condensateurs à feuille / film.

Tableau 1.4 Principaux articles sur les condensateurs à feuille

Technologies	Condensateur à feuille / film enroulé	Condensateur à feuille / film empilé	Combinaison métallisée hybride film / feuille	Condensateurs à languette insérés	Condensateur film/feuille multisection
References	(Clelland & Price, 2011)	(Kerrigan, 2011)	(Anderson, 1996)	(Boggs et al., 2010), (Y. Yoshida & M. Nishimatsu, 1986)	(Boggs et al., 2010; Qin & Boggs, 2010a; Y. Yoshida & M. Nishimatsu, 1986)

Les condensateurs à film/feuille à multi-section, comme le montre la figure 1.6, sont constitués d'électrodes à feuille métallique séparées par une ou plusieurs couches de matériau diélectrique. Ils sont enroulés en spirale et les pattes sont reliées aux électrodes pour réaliser les connexions de ce type de ce condensateur. Le principal avantage des enroulements film/feuille multi-section est la réduction de volume dans les zones de marge entre les sections. Il permet de mettre plusieurs sections en série. Les principaux inconvénients d'un tel condensateur sont qu'ils ne sont pas auto-cicatrisant comme les condensateurs métallisés et qu'ils ont une haute inductance série équivalente (ESL) (Qin & Boggs, 2010a).

La figure 1.6 montre la configuration d'un condensateur multi-section film/feuille.

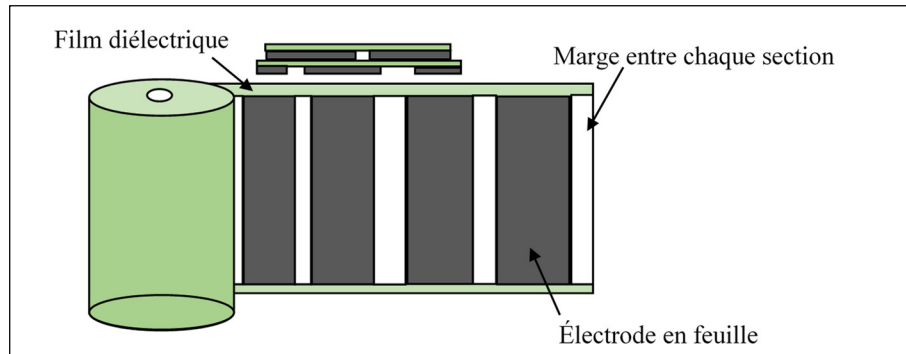


Figure 1.6 Condensateur feuille/film multi-section
Adaptée de Qin & Boggs (2010a)

La configuration des condensateurs film/feuille empilés est la même que celle des condensateurs métallisés empilés mais la différence est que des électrodes métalliques sont utilisées dans ce type de condensateur et, comme les condensateurs film / feuille multi-section, elles ne sont pas auto-cicatrisante. La figure 1.7 montre différents types de condensateurs à film/feuille / enroulés empilés. La technologie d'utilisation de condensateurs hybrides film / feuille métallisés combinés consiste à utiliser une ou plusieurs électrodes en feuille et une surface métallisée du film. L'action combinée de ces deux types de configuration permet d'obtenir les avantages combinés de l'utilisation de condensateurs métallisés et d'électrodes en feuille.

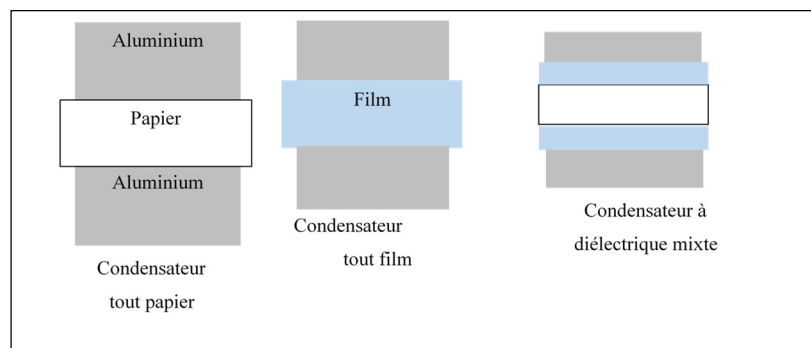


Figure 1.7 Différents types de condensateurs à film/feuille

1.5 Matériaux diélectriques utilisés dans les condensateurs haute tension

1.5.1 Matériaux diélectriques

Les matériaux diélectriques se caractérisent par une absence de charges libres dans leur volume constitutif. Cependant, il est possible que les chaînes constituant un matériau polymère aient un mouvement de déplacement local sous l'action d'un champ électrique extérieur. Lorsqu'un champ électrique est appliqué à un matériau diélectrique, les dipôles constitutifs s'orientent avec un retard dans le temps. L'orientation de ces dipôles se manifeste sous le phénomène de polarisation. Ce mécanisme de déformation de la distribution des charges électriques est appelé phénomène de polarisation. La polarisation est une grandeur physique utilisée dans l'étude des propriétés des matériaux diélectriques. Il désigne la densité des dipôles électrostatiques. Son mécanisme s'explique par l'augmentation de la capacité du condensateur à stocker des charges après l'introduction d'un diélectrique. Il existe quatre types de polarisation: électronique, atomique, d'orientation et inter-faciale. Il existe deux types de charges sur les électrodes des condensateurs, les charges libres liées au maintien de la tension sous vide ainsi que les charges liées nécessaires pour compenser le phénomène de polarisation. La figure 1.8 présente le phénomène de polarisation dans un matériau diélectrique. Sur la figure 1.8, on peut observer les charges libres (charges négatives et positives) aux bornes de l'électrode et les charges liées (dipôle).

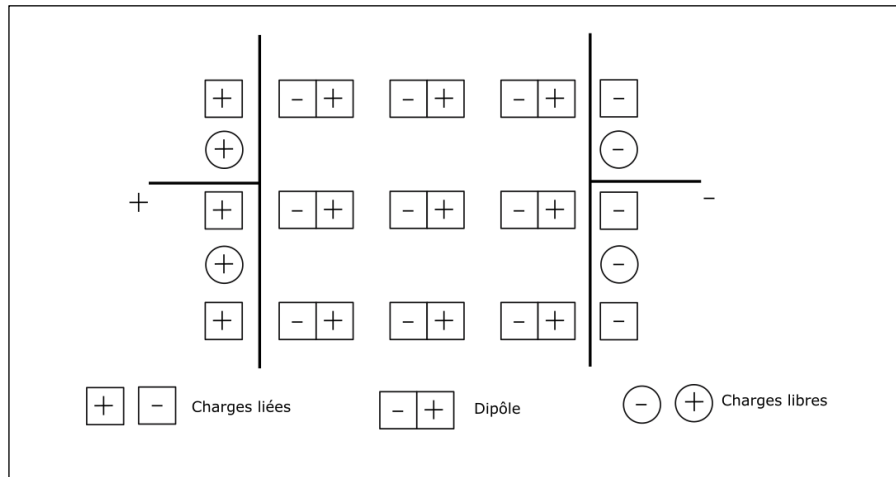


Figure 1.8 Illustration de la polarisation d'un diélectrique
Adaptée de David (2010a)

Un dipôle électrique est formé par deux charges Q de signes opposés séparées par une distance. Le moment dipolaire électrique est défini par :

$$\vec{p} = q\vec{l} \quad (1.1)$$

La polarisation due à ces dipôles correspond à la somme vectorielle de tous les dipôles par unité de volume. On peut donc définir la polarisation \vec{P} par :

$$\vec{P} = \frac{1}{\Omega} \sum_{i \in \Omega} \vec{P}_i \quad (1.2)$$

Les unités de la polarisation sont les C/m^2 . Si on considère un matériau diélectrique linéaire, homogène et isotrope, lorsqu'un champ électrique est appliqué à ce dernier, la relation entre \vec{P} et \vec{E} est linéaire. On peut donc écrire :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} \quad (1.3)$$

Où χ est la susceptibilité électrique du matériau. Lorsque le champ électrique est variable dans le temps, une façon pratique de tenir compte du retard entre la polarisation et le champ électrique (principe de causalité) est d'utiliser l'algèbre complexe. La susceptibilité électrique devient alors un nombre complexe et est sans dimension. L'expression de la susceptibilité est alors la suivante :

$$\chi^*(\omega) = \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) \quad (1.4)$$

Lorsque la polarisation est due à un mécanisme de relaxation dipolaire ayant une constante de temps τ , une façon simple (mais qui ne correspond que rarement à l'observation expérimentale) d'exprimer la variation de la susceptibilité complexe en fonction de la fréquence consiste à utiliser les équations de Debye :

$$\chi'(\omega) = \chi_\infty + \frac{(\chi_s - \chi_\infty)}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (1.5)$$

$$\chi''(\omega) = \frac{(\chi_s - \chi_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}$$

Les équations de Debye pour la permittivité complexe en fonction de la fréquence sont :

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (1.6)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}$$

Avec ε_s , la permittivité électrique statique (pour $f = 0$); ε_∞ , la permittivité électrique à fréquence infinie et ω , la pulsation électrique ($\omega = 2\pi f$).

Les permittivités réelle et imaginaire sont influencées par la température ainsi que par la fréquence. Le temps de relaxation dépend de la température, avec une dépendance qui, souvent, suit la forme de la loi d'Arrhenius:

$$\tau = \tau_0 e^{e_a/kT} \quad (1.7)$$

Avec e_a , l'énergie d'activation; k , la constante de Boltzmann.

L'équation ci-dessous représente la contribution de la polarisation induite. Celle-ci provient de la polarisation électronique et atomique qui sont très rapides. À des fréquences inférieures aux fréquences optiques, on peut considérer qu'elle est proportionnelle au champ appliqué (le retard est négligeable) et peut donc s'écrire :

$$\vec{P}_r = N_i \alpha_r \vec{E} \quad (1.8)$$

Où P_r indique la polarisation rapide, c'est-à-dire celle qui survient très rapidement après l'application d'un champ électrique. N_i représente le nombre de dipôles induits par unité de volume et α_r , la polarisabilité qui dépend de la nature du matériau. La polarisation totale, incluant les dipôles induits et l'orientation des dipôles permanents, peut être exprimée par :

$$\vec{P}_{tot} = \left(\frac{N_d \mu^2}{3kT} + N_i \alpha_r \right) \vec{E} \quad (1.9)$$

où μ est le moment dipolaire du dipôle permanent, N_d le nombre de ces dipôle par unité de volume, T la température en Kelvin et k la constante de Boltzmann ($k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K).

Dans le domaine de temps, le phénomène de polarisation se manifeste sous deux formes : la polarisation rapide P_∞ , qui réagit rapidement à la sollicitation de la tension et la polarisation correspondante aux phénomènes de relaxation dipolaire $P_d(t)$ (celle qui réagit avec un retard).

La polarisation dipolaire dans le domaine de temps, selon le modèle de Debye, est :

$$P_d(t) = P_{ds}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1.10)$$

Avec P_{ds} , la polarisation dipolaire à l'équilibre et τ , le temps de relaxation

La polarisation totale $P(t)$ dans le domaine de temps est la somme de la polarisation rapide et de la polarisation dipolaire.

$$P(t) = P_\infty + P_{ds}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1.11)$$

L'un des paramètres importants pour évaluer les mécanismes de polarisation d'un matériau diélectrique est la permittivité relative ou constante diélectrique. Elle est une propriété physique des matériaux diélectrique. Tout comme la susceptibilité c'est un nombre complexe. La permittivité relative ou constante diélectrique est décrite par l'expression suivante:

$$\epsilon_r = 1 + \chi = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.12)$$

Avec ϵ_0 , la permittivité du vide et ϵ la permittivité du matériau.

1.5.2 Capacité électrique

Le principal avantage des condensateurs réalisés avec des polymères est la possibilité de réaliser avec ces derniers des films minces de haute qualité. Les principales caractéristiques physiques d'un condensateur film sont : la capacité, la tangente de l'angle de pertes ($\tan \delta$ ou facteur de dissipation) et la rigidité diélectrique (Beauger, Haussonne, & Nipce, 2007).

En négligeant les effets de bord, la capacité d'un film diélectrique de surface S et d'épaisseur e s'écrit :

$$C = \frac{\epsilon S}{e} \quad (1.13)$$

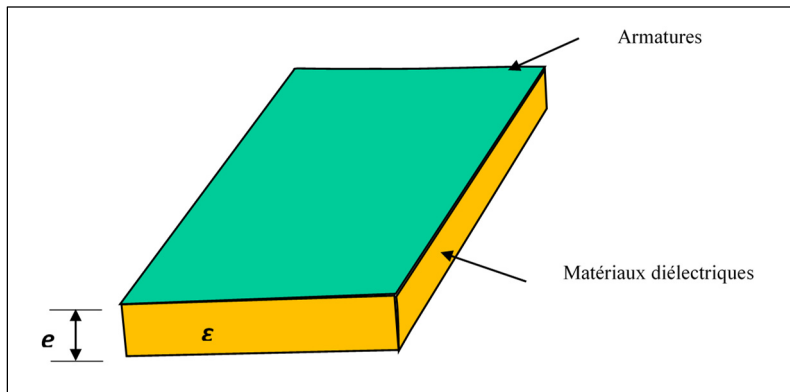


Figure 1.9 Éléments du condensateur
Adaptée de Hantouche (1996)

L'impédance du condensateur qui est l'inverse de l'admittance $Y(\omega)$ d'un condensateur est :

$$Z^*(\omega) = \frac{U^*}{I^*} = \frac{1}{Y^*(\omega)} \quad (1.14)$$

Dans le cas des relations de l'admittance et de l'impédance du condensateur, I est le phasor du courant. Il est généralement un nombre complexe.

Les propriétés électriques d'un condensateur sont fonction à la fois du type de matériaux qui le composent (diélectrique, métallisation, etc.), de la géométrie du film choisie et de la manière dont les bornes du condensateur sont connectées à l'enroulement (Huan et al., 2016).

La capacité complexe est souvent utilisée pour décrire le comportement d'un matériau diélectrique. Elle est liée au courant et la tension électrique par l'expression suivante :

$$I^*(\omega) = j\omega C^*(\omega)U^*(\omega) \quad (1.15)$$

$$I^*(\omega) = \omega C_o \left[\left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_o} + \varepsilon_r''(\omega) \right) + j\varepsilon_r'(\omega) \right] U^*(\omega)$$

Où la capacité complexe est donnée par :

$$C^*(\omega) = C'(\omega) - jC''(\omega) = C_o \left[\varepsilon_r'(\omega) - j \left(\varepsilon_r''(\omega) + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_o} \right) \right] \quad (1.16)$$

σ : est la conductivité du matériau diélectrique

1.5.3 Tangente de l'angle de perte

La tangente de l'angle de perte ou le facteur de dissipation diélectrique est donnée par

$$tg\delta(\omega) = \frac{\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_o} + \varepsilon_r''(\omega)}{\varepsilon_r'(\omega)} \quad (1.17)$$

Le courant I parcourant un condensateur n'est pas tout à fait en quadrature de phase avec la tension U à ses bornes. L'angle de pertes δ , est le complémentaire de l'angle de phase φ , existant entre la tension et le courant (Hantouche, 1996).

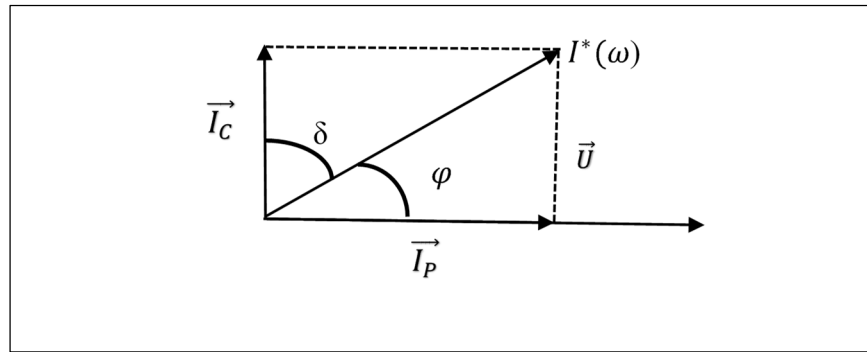


Figure 1.10 Diagramme du courant et de la tension
Adaptée de David (2010b)

Où U est le potentiel aux bornes du condensateur, I_c le courant purement capacitif et I_p le courant de perte d'énergie dans le diélectrique due à la polarisation et à la conduction. Les figures 1.11 et 1.12 montrent la réponse des pertes diélectriques du matériau polaire (PET) et du matériau non polaire (PE) en fonction de la température et de la fréquence. Sur la figure 1.11, on peut observer des maximums associés aux mécanismes de relaxations α , β . Ces pics sont dus aux mouvements des chaînes principale et latérale et / ou des mouvements de rotation de groupes polaires du polymère.

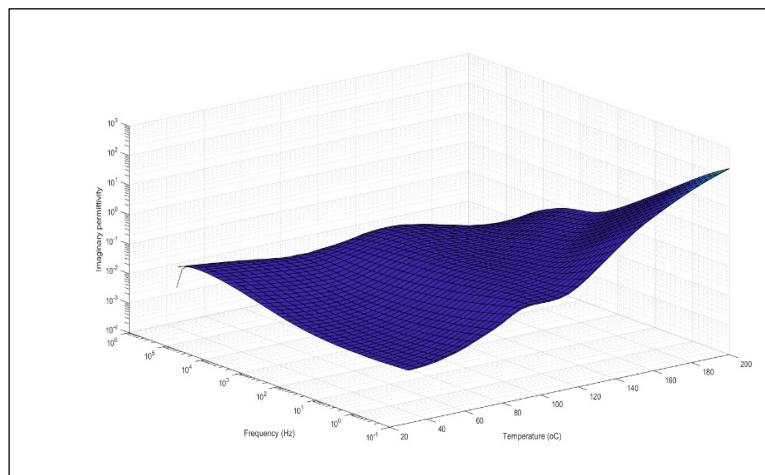


Figure 1.11 Pertes diélectriques du PET

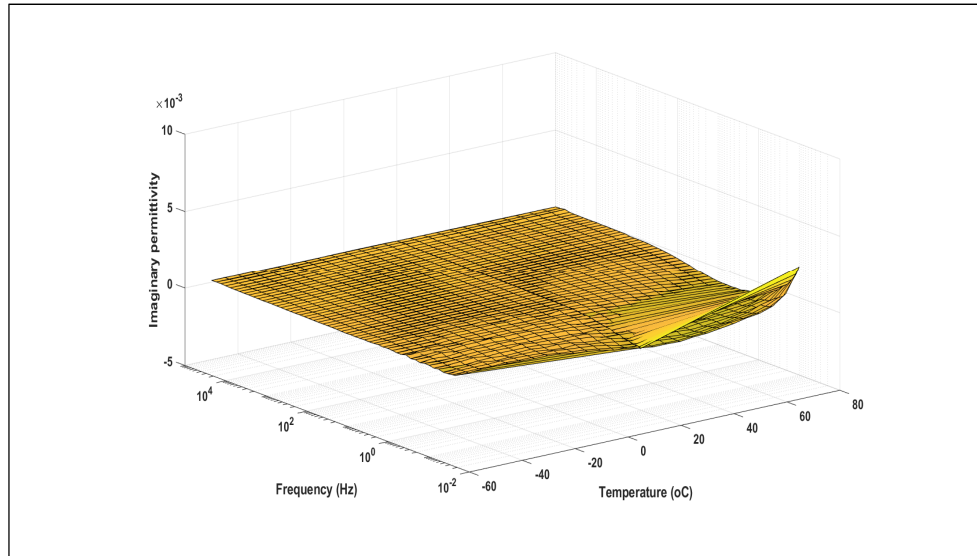


Figure 1.12 Pertes diélectriques du polyéthylène basse densité (LDPE)

1.5.4 Rigidité diélectrique et claquage

La rigidité diélectrique (tension de claquage) E est définie comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perte des propriétés isolantes dans des conditions d'essais spécifiées et la distance entre les deux électrodes de part et d'autre du polymère auxquelles est appliquée la tension :

$$E = \frac{U}{e} \quad (1.18)$$

Avec e la distance inter-électrodes en (m), U la tension appliquée pour laquelle le claquage se produit en (V); la rigidité diélectrique qui s'exprime en V/m ou plus couramment en kV/mm. La rigidité diélectrique dépend fortement de l'épaisseur du matériau et diminue généralement quand l'épaisseur augmente. Une façon commune d'exprimer cette dépendance est d'utiliser la relation empirique suivante :

$$E_{BD}(d) = kd^{-n} \quad (1.19)$$

avec E_{BD} où E est le champ électrique appliqué, l'épaisseur d et des constantes empiriques des matériaux k et n (Chen, Zhao, Li, & Zhong, 2012; Thomas Heid, 2015). La rigidité diélectrique

des condensateurs de puissance dépend en grande partie de l'épaisseur totale du diélectrique (Y Yoshida & M Nishimatsu, 1986). On distingue trois mécanismes de rupture diélectrique à savoir : les phénomènes par avalanche, électromécanique et thermique.

La multiplication par avalanche se produit lorsque les porteurs de charges acquièrent suffisamment d'énergie cinétique entre deux collisions pour produire des phénomènes d'ionisation et donc de multiplication des porteurs. Le claquage thermique intervient lorsque l'échauffement produit par effet Joule ne peut plus être compensé soit localement, soit macroscopiquement par la dissipation thermique au sein du matériau. Le claquage électromécanique provient de la pression électrostatique appliquée sur les électrodes d'un isolant sous tension (Bureau, 2016; Teyssedre & Boudou, 2010). L'imprégnant utilisé dans les films a pour effet d'augmenter la rigidité de ces derniers (Schneuwly, Groning, Schlapbach, Irrgang, & Vogt, 1998).

La technologie actuellement utilisée pour fabriquer des condensateurs haute tension et ultra haute tension consiste en l'utilisation de bobines placées en série, formant ce que l'on appelle la partie active du condensateur, qui est imprégnée, par exemple dans une huile synthétique, pendant le processus de fabrication. Comme expliqué précédemment dans la section 1.2, le système d'isolation diélectrique entre deux électrodes d'aluminium consécutives est composé d'un mélange de papier et film diélectrique, le papier présentant une bonne compatibilité avec l'huile d'imprégnation. Les caractéristiques électriques des condensateurs à film sont directement liées à celles des matériaux diélectriques utilisés.

Les condensateurs sont généralement bobinés en rouleaux de polypropylène à orientation biaxiale (BOPP) en combinaison avec une fine feuille d'aluminium. Selon l'application, d'autres polymères tels que le polyéthylène (PE), le polystyrène (PS), le polypropylène (PP), le polycarbonate (PC), le polyéthylène naphtalate (PEN), le polyphényl sulfure (PPS), le polytétrafluoréthylène (PTFE), les polyester imides (PEI), polyéthylènetéréphtalate (PET), polybutylènetéréphtalate (PBT), polyétheréthercétone (PEEK), polychlorure de vinyle (PVC), polyfluorure de vinylidène (PVDF), polyimides (PI), polyamides (PA), polyméthylméthacrylate (PMMA) peuvent être utilisés (Bramouille, 1998; Ho & Greenbaum,

2018; Qi et al., 2014; Reed & Cichanowski, 1994; Reuter et al., 1991; Streibl, Karmazin, & Moos, 2018).

Les trois propriétés diélectriques clés pour choisir un bon matériau de film pour un condensateur sont la constante diélectrique ou la permittivité relative, le facteur de dissipation et la rigidité diélectrique (Ho & Greenbaum, 2018). Pour une application à haute température, les propriétés thermiques sont également critiques et les polymères diélectriques actuellement utilisés dans les condensateurs pour les applications à haute température sont le polytétrafluoroéthylène (PTFE), le polycarbonate (PC), le poly (téréphtalate d'éthylène) (PET), le poly (sulfure de phénylène) (PPS), du poly (2,6-naphtalate d'éthylène) et du polypropylène (PP).

Le polypropylène (PP) est le film le plus utilisé pour les applications haute tension et haute fréquence. Il peut être fabriqué avec des épaisseurs aussi faible que 1,6 μm . C'est un matériau non polaire. Il présente une constante diélectrique d'environ 2,2 et un facteur de dissipation très faible de l'ordre de 10^{-4} qui est essentiellement indépendant de la fréquence sur plusieurs décades à des températures inférieures à 100 °C. Sous forme de couches minces, il présente une rigidité diélectrique de $\sim 700 \text{ V} / \mu\text{m}$ (Rytöluoto, Gitsas, Pasanen, & Lahti, 2017). Sa conductivité thermique sous forme amorphe est inférieure à 0,2 W/(m K) et inférieure à 0,3 W/(m K), sous forme semi-cristalline non orientée. Sa conductivité thermique sous sa forme biaxiale est de 0,6 W/(m K) et sa température maximale de fonctionnement est de 105 °C (Ho & Greenbaum, 2018).

Le tableau 1.5 résume les propriétés thermiques et diélectriques des films les plus souvent utilisés dans les condensateurs haute tension.

Tableau 1.5 Résumé des caractéristiques générales des films polymères diélectriques
 Adapté de Alobaidi (2016); Anderson (1996); Caliari et al. (2013); Chisca, Sava, Musteata, & Bruma (2011); Diaham, Locatelli, Lebey, & Dinculescu, (2009); Göttgens & Sanner (2005); Ho & Greenbaum (2018); Ida (2014); Keyrouz (2011); Kuchler (2018); Pfeiffenberger et al. (2018); Qi et al. (2014); Rabuffi & Picci (2002); Ruan et al., (2018); W. J. Sarjeant et al. (1998); Streibl et al. (2018); D. Tan, Zhang, Chen, & Irwin (2014); Q. Tan, Irwin, & Yang (2006); Y. Yoshida & M. Nishimatsu (1986); Zhou & Chen (2017)

Polymère film	Constante Diélec- trique	Rigidité Diélectrique approxi- mative (MV/m)***	Facteur de dissipa- tion à 1kHz (%)	Tempé- rature de fonction- nement (°C)	Tempé- rature de fusion (°C)
Polypropylène (PP)	2,2	640	0,02	- 55 à 105	178
Polyester (PET)	3,3	570	0,5	- 55 à 125	254
Polyphé- nylène sulfure (PPS)	3	550	0,05	- 55 à 200	283
Polyester (PEI)	3,3	550 à 22°C,	0,5	125	255
Polystyrène	2,5	200	0,06	85	240

*** La valeur exacte de la rigidité diélectrique dépend fortement de la procédure de mesure (épaisseur de l'échantillon, milieu environnant, vitesse de montée en tension, type d'électrodes, etc.) et par conséquent elle varie considérablement d'une référence à l'autre (Couderc, David, Corlu, Fréchette, & Savoie, 2011; Ritamäki, 2019).

1.6 Traitements de film polymère

Le traitement de surface des films avant leur métallisation et leur enroulement permet de favoriser leur adhérence et d'améliorer leurs performances. L'utilisation du traitement corona est une méthode standard pour le polypropylène. Cette technique permet de créer différents groupes ioniques (groupes hydroxyle, carbonyle et carboxylique) à la surface des films, ce qui augmente leurs concentrations en groupes polaires. La présence de ces groupes fonctionnels sur la surface du film augmente l'énergie libre de la surface du film. Le traitement Corona n'est généralement pas nécessaire avec d'autres polymères. Ces dernières années, d'autres traitements tels que le traitement plasma avec des gaz et vapeurs fluorés, l'irradiation ultraviolette et le bombardement électronique (e-beam) ont été réalisés pour modifier les propriétés des surfaces des films (Kalapat & Amornsakchai, 2012; Novák et al., 2011; Reed & Cichanowski, 1994; Vlaeva et al., 2012).

1.7 Encapsulant

Le but principal de l'encapsulant est de consolider et d'améliorer la rigidité diélectrique de l'ensemble du condensateur en remplissant les éventuels vides ou entrefer et en améliorant ainsi la résistance aux décharges partielles (Keyrouz, 2011). Afin d'éviter les défauts à l'intérieur des condensateurs utilisant un liquide d'imprégnation, celui-ci doit toujours être dans une structure étanche à l'air pour éviter la perte de l'imprégnateur. La plupart des encapsulant utilisés dans les condensateurs haute tension sont des polymères, qui sont initialement sous forme liquide, des huiles ou des matériaux thermodurcissables.

Les huiles utilisées comme milieu d'imprégnation pour les diélectriques solides ont évolué au fil du temps, passant de l'huile minérale au mono-di-benzyl-toluène MDBT, en passant par les huiles synthétiques telles que le polychlorobiphényle (PCB), le néocrapate de benzyle (BNC) et le mono-isopropyl- biphényle (MIPB).

Les imprégnant liquides les plus courants sont les huiles minérales, les huiles végétales telles que les huiles de ricin, de colza et de coton, certaines cires et les huiles synthétiques

biodégradables telles que le PXE (phénylxylylthane) et le M / DBT (mono / dibenzyltoluène, Jarylec). Ceux-ci ont complètement remplacé les biphenyles chlorés ou PCB (Pyrène), qui sont actuellement interdits pour des raisons environnementales et sanitaires.

Plusieurs huiles minérales ou synthétiques sont utilisées pour l'imprégnation du diélectrique, par exemple le trichlorodiphényle (TCD) a été utilisé comme imprégnant sur des diélectriques de couches de papier ou de papier mixte. Le PCB a été remplacé par des huiles d'hydrocarbures aromatiques synthétiques (AHC), telles que l'alkylnaphtalène (AN) et l'alkyldiphénylthane (ADE). D'autres huiles ininflammables et à faible permittivité telles que les huiles de silicone et le phosphate d'alkylphényle ont été utilisées. Les huiles d'hydrocarbures aromatiques (AHC), telles que AN et ADE, ont toutes deux d'excellentes propriétés d'absorption de gaz, une bonne compatibilité et sont sans danger pour l'environnement. Cependant, comme l'AHC a une faible permittivité et est inflammable, d'autres huiles isolantes telles que l'huile de silicone phénylméthylque et des mélanges d'AHC et de TCP sont maintenant partiellement utilisées pour les condensateurs de puissance (Y. Yoshida & M. Nishimatsu, 1986).

Les imprégnant liquides offrent d'excellentes performances diélectriques aux condensateurs, mais les exigences écologiques et de sécurité orientent la recherche vers des solutions utilisant d'autres imprégnant tels que l'utilisation de résines époxy thermodurcissables, d'huiles végétales et de gaz. Si un imprégnant solide est nécessaire, une alternative intéressante vient de l'utilisation de résines époxy, qui sont une bonne alternative en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, électriques et chimiques (T. Heid, 2015). Enfin, les gaz diélectriques peuvent jouer le rôle d'imprégnant. Le principal imprégnant gazeux utilisé aujourd'hui est l'azote N_2 qui pour certaines applications est mélangé à d'autres gaz comme l'hexafluorure de soufre SF_6 (Bramouille, 1998). D'autres gaz comme l'air atmosphérique, le CO_2 , les fluoronitriles $((CF_3)_2CFCN)$ et les fluorocétone $CF_3C(O)CF(CF_3)_2$ (cétone C5K) peuvent également être utilisés. La rigidité diélectrique de l'air atmosphérique est de 3 kV / mm, de SF_6 est trois fois plus élevée que la rigidité diélectrique de l'air, de N_2 est de 0,44 par rapport à la rigidité diélectrique de SF_6 , de mélanges SF_6 et N_2 avec une proportion de SF_6 de 20% à environ 70% de la rigidité électrique du gaz SF_6 pur, des fluoronitriles $((CF_3)_2CFCN)$ est le double de la rigidité diélectrique du SF_6 et des fluorocétone $CF_3C(O)CF(CF_3)_2$ (cétone C5K) est de 85%

des rigidité diélectrique de SF₆ à -15 °C (Hyrenbach & Zache, 2016; Küchler, 2018; Nechmi, Beroual, Girodet, & Vinson, 2016; Preve, Maladen, & Piccoz, 2016; Romero, R  cz, M  trai, Bokor, & Cselk  , 2017).

Les tableaux 1.6 et 1.7 donnent une liste des principaux matériaux d'encapsulation ou d'imprégnation utilisés pour la fabrication des condensateurs haute tension ainsi que leurs propriétés diélectriques.

Tableau 1.6 Vue d'ensemble des matériaux isolants thermodurcissables et élastomères
Adapté de Berger; Jin, Tsekmes, Wu, Mor, & Smit (2017); Küchler, 2018; Yin et al. (2017)

Thermodurcissable	Permittivité relative	tan ��	Conductivité (S/m)	Rigidité diélectrique
Résines Epoxy (EP)	3,5 �� 4	$< 10^{-2}$	10^{-12} à 10^{-15}	20 MV/m
Polyuréthanes (PU) (thermodurcissable)	4	$2 \cdot 10^{-2}$ (1 MHz)	10^{-11}	-
Polyuréthanes (PU) (��lastom��re)	7,4	$> 5 \cdot 10^{-2}$ (1 MHz)	10^{-10} �� 10^{-12}	88.6 (V/ ��m)
Résine phénolique et papier imprégné de résine (RBP)	5	0,1 (1 MHz)	10^{-11}	-
Silicone	2,8 �� 3	0,5 à 1 %	10^{-13}	26 - 36 kV/mm

Tableau 1.7 Vue d'ensemble des liquides isolants
 Adapté de Arora & Mosch (2011); Jariyanurat, N., Potivejkul, & Chotigo (2017);
 Küchler (2018); Mahanta (2020); Mehta, Kundu, Chowdhury, Lakhiani, & Jhala,
 (2016a, 2016b); Oommen (2002); Rouse (1998)

Liquides	Permittivité relative	Tan δ	Rigidité diélectrique (kV/mm)
Huile minérale	2,2 à 20 °C	< 0.05 (25°C)	30 - 85
Huiles de silicone	2,7 à 20 °C 2,3 à 200°C	1 à $2 \cdot 10^{-4}$	35 - 60
Liquides d'ester	3,3	$\geq 10^{-3}$	45 - 70
Les huiles végétales	3,1	0,25 (25 °C)	82 - 97
Liquides d'ester naturels	3,1 à 20 °C	$\leq 0,2$ à 25 °C	33,8

1.8 Mesure et analyse des décharges partielles (DP)

Une décharge est dite partielle lorsqu'elle ne court-circuite pas l'ensemble de l'isolation. On distingue plusieurs types de décharges partielles : les décharges internes, les décharges superficielles, les décharges couronne et les décharges se propageant à partir d'un défaut dans les diélectriques solides appelée arbre électrique (Bureau, 2016; Danouj, 2012). Les décharges internes sont dues principalement aux cavités d'air, ou d'autres gaz, incluses dans un diélectrique solide ou liquide. Les décharges superficielles se produisent le long de la surface d'un diélectrique à partir des électrodes et elles peuvent être par exemple provoquées par la pollution des surfaces (Bureau, 2016). Enfin les DP couronne ont lieu autour d'une électrode métallique (Teyssedre & Boudou, 2010) où le champ électrique est divergeant (pointe, coin, conducteur cylindrique, ...).

Les phénomènes de DP jouent un rôle important dans la défaillance de l'isolant d'où l'importance de les mesurer et éventuellement d'éliminer les sources de décharges. De plus, la technique de mesure et d'analyse des DP survenant dans des structures ou des assemblages isolants peut être utilisée pour détecter les faiblesses avant qu'elles ne conduisent à une défaillance catastrophique (David A Nattrass, 1988). La détection des DP est un essai non destructif qui de plus peut être fait « en ligne » c'est-à-dire sans retirer un équipement du service. De nombreuses méthodes ont été mises au point pour mesurer, évaluer et identifier ces phénomènes de décharges partielles: méthodes électriques, méthode acoustique, méthode optique, méthode électrique sous rayons X (Hantouche, 1996). La technique électrique permettant la détection des DP consiste à mesurer les pertes diélectriques ou à mesurer les impulsions de décharge avec un coupleur capacitif ou inductif qui permettent de séparer le signal haute fréquence des DP de celui de la tension à la fréquence de puissance. Des opérateurs statistiques sont utilisés comme méthode de classification des décharges partielles, et d'autre part, comme indicateurs de vieillissement des matériaux isolants (Sili, 2012).

La mesure des DP peut être également faite à l'aide d'une caméra sensible au rayonnement UV afin d'observer et de photographier les décharges externes (Jorice G. C Samuel, Guillaume Lucas, Mingli Fu, Paul J Howard, & Stephanie Lafon-Placette, 2012). La méthode la plus ancienne de détection des DP, et possiblement la plus simple, repose sur l'écoute du bruit acoustique émis par la décharge (le test de sifflement). L'utilisation de la méthode optique est limitée aux décharges externes ou dans des supports transparents et n'est donc pas applicable dans la plupart des cas. Seules les méthodes de détection acoustiques modernes utilisant des transducteurs à ultrasons peuvent être utilisées avec succès pour localiser les décharges. Néanmoins, les méthodes de détection les plus fréquemment utilisées et les plus efficaces sont les méthodes électriques telles que recommandées par la norme International Electrotechnical Commission (IEC) 60270-2000 (IEC, 2000). Ces méthodes visent à séparer les courants d'impulsion liés aux décharges partielles de tout autre phénomène (Kuffel, Zaengl, & Kuffel, 2000).

Il est essentiel que le niveau de bruit de fond soit aussi bas que possible avant le début des tests de mesure de DP. Si des interférences proviennent de l'alimentation principale, des filtres peuvent être utilisés pour atténuer ces interférences. Si le bruit de fond est toujours élevé, il est recommandé de faire les mesures de DP pendant une période calme lorsque certains équipements ne fonctionnent pas (David A. Nattrass, 1988). Les niveaux élevés du bruit de fond peuvent être causés, par exemple, par des opérations de commutation dans d'autres circuits, par des harmoniques plus élevés de la tension de test dans la bande passante du système de mesure ou à proximité des machines à commutation, des tests à haute tension à proximité, des transmissions radio, etc., y compris le bruit inhérent à l'instrument de mesure lui-même (Kuffel et al., 2000).

Dans cette revue de la littérature, nous sommes concentrés sur les différentes technologies et matériaux utilisés pour la fabrication de condensateurs haute tension. Au cours de cette revue, il a été souligné que différents types de matériaux sont utilisés et que leurs choix dépendent des caractéristiques particulières attendues par le fabricant du condensateur haute tension. Ainsi, pour les applications haute tension, le polypropylène bi-orienté (BOPP) est le matériau le plus utilisé. Les imprégnant liquides les plus courants sont les huiles minérales et, plus récemment, les résines époxy, silicone et polyuréthane.

Le traitement de surface des films comme par exemple un traitement corona avant le bobinage des condensateurs permet de favoriser leur adhésion et d'améliorer leurs performances. Cependant, l'utilisation de certains gaz, huiles et résines dans les condensateurs augmente l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ainsi, la volonté de réduire les émissions de carbone passe par la production d'une énergie plus propre et, par conséquent, de condensateurs et d'équipements haute tension répondant aux réglementations écologiques. Il est donc important de relever les nouveaux défis des matériaux diélectriques. Ainsi, pour se conformer à ces réglementations, de nombreuses industries investissent aujourd'hui dans l'utilisation de matériaux respectueux de l'environnement qui pourraient être utilisés dans les condensateurs haute tension.

CHAPITRE 2

CONCEPTION DES CONDENSATEURS SEC HAUTE TENSION

2.1 Conception des condensateurs sec haute tension

Un condensateur VPI est fabriqué selon le procédé Vacuum Pressure Impregnation (VPI) et imprégné par une résine thermodurcissable de faible viscosité. La technologie actuellement utilisée pour la fabrication des condensateurs haute tension consiste à utiliser un empilement de rubans minces (électrodes et mur diélectrique) enroulés, dont les configurations peuvent changer, en fonction des performances électriques attendues. Les bobines sont enroulées et assemblées en série ou en parallèle, formant ce qu'on appelle la partie active du condensateur. Pour protéger la partie active de l'air et de l'humidité et pour combler les vides possibles dans la partie active, elle est insérée dans un moule étanche et imprégné d'une résine thermodurcissable. L'ensemble bobine/résine est ensuite polymérisé dans un four pour obtenir un mur diélectrique solide (condensateur sec). La figure 2.1 présente le processus de fabrication de la partie active d'un condensateur sec haute tension.

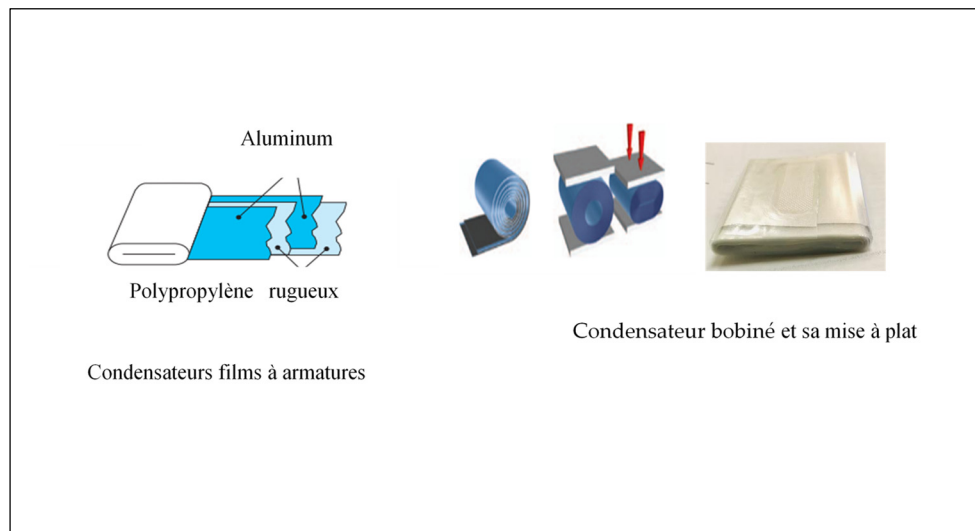


Figure 2.1 Processus de fabrication de la partie active d'un condensateur sec

La fabrication du condensateur sec commence par la connexion de fils souple d'aluminium avec un adhésif haute température à chaque électrode de la partie active (voir figure 2.2). Les parties actives sont fabriquées par le partenaire industriel Condis.



Figure 2.2 Partie active avec les connexions

Après la connexion des fils d'aluminium, le condensateur est ensuite mis dans un moule (en aluminium) pour être comprimé à l'aide de cales en polycarbonate usinées (voir Figure 2.3). Selon le cahier des charges, le condensateur est comprimé de façon à avoir une capacité finale après imprégnation d'environ 70 nF et pour pouvoir tenir à des contraintes électriques jusqu'à 60 kV/mm sans la présence des DP et tenir à 100 kV/mm pendant 1 min sans claquer. Pour un condensateur sec ayant une seule bobine (obtenu avec la méthode VPI), fonctionnant à une fréquence de 60 Hz, son facteur de dissipation doit être inférieur à 2×10^{-3} et la rigidité diélectrique équivalente de l'isolant doit être supérieure à 112 kV/mm.

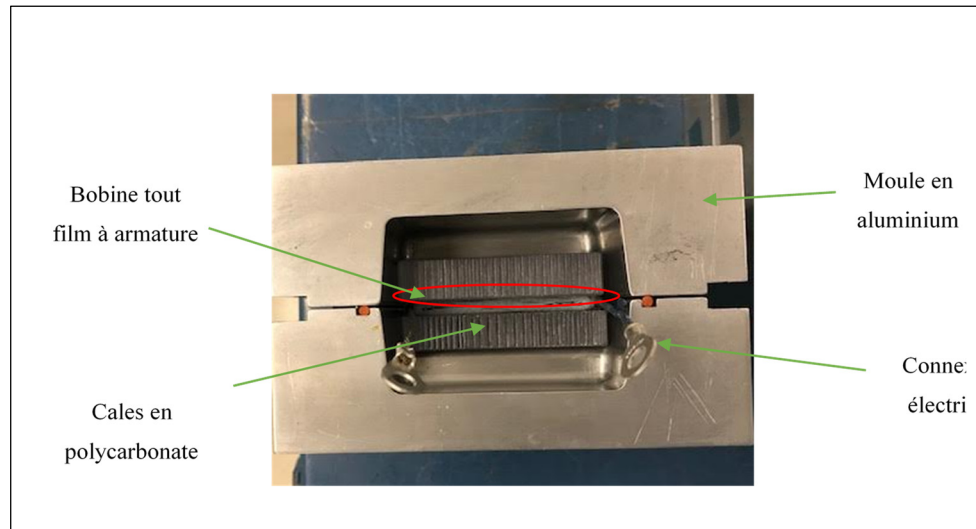


Figure 2.3 Vue de dessus du montage d'une bobine dans le moule de fabrication

Après le montage du condensateur dans le moule, il est mis dans une étuve pour être séché selon le procédé VPI pendant 24 heures dans une étuve à la température de 80°C et à une pression de 1 mbar. Le séchage permet de retirer l'humidité du condensateur. Cette étape est suivie par la préparation de la résine dans un pot (verre hermétique) et le dégazage de la résine. Les différents composants de la résine sont mélangés en proportion dans le pot en verre (figure 2.4).

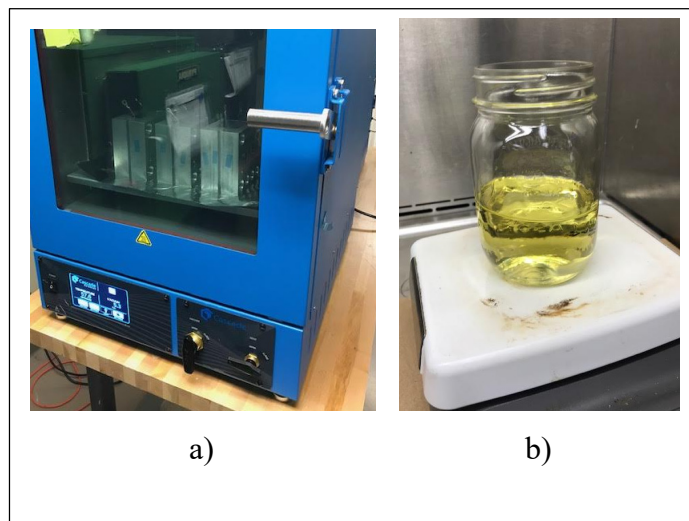


Figure 2.4 a) Séchage du condensateur, b) mélange de résine

Afin de contrôler la température de la résine, elle est chauffée pendant le mélange des différents constituants à une température de 80°C. Le mélange est réalisé à l'aide d'un agitateur magnétique (voir figure 2.4). Le mélange est constitué de résine époxy CY 192 (100g) contenant une proportion de 15 g de plastifiant DY 040, du durcisseur Aradur HY 918 (100 g) et d'accélérateur DY062 (0,1 g).

Le pot de résine et le condensateur sont placés dans deux différentes étuves (figure 2.5). Le dégazage de la résine est réalisé à la même température et pression que l'enroulement capacitif.

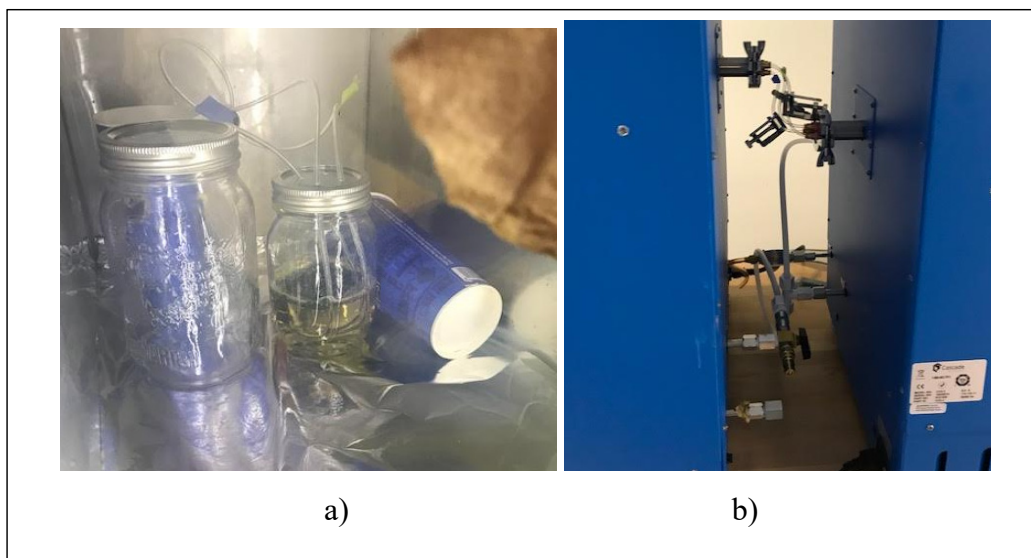


Figure 2.5 a) Étuve du condensateur et de la résine, b) dégazage de résine

Le dégazage dure 15 min. Il permet de retirer les bulles d'air de la résine. Dans le montage expérimental du procédé VPI utilisé, le moule est placé dans la grande étuve et le pot de résine est placé dans la petite étuve afin de pouvoir permettre le transfert de la résine car la pression dans le pot est indépendante de la pression des deux étuves. Pour permettre le transfert une différence de pression est réalisée dans le pot de résine et l'étuve. Pendant le transfert, une pression d'air est envoyée à la surface de la résine placée dans la petite étuve. Le transfert est réalisé à l'aide d'un tuyau reliant le moule et le pot de résine à la température de 80°C. Le temps de transfert varie entre 2 à 5 min. Le transfert est suivi de l'imprégnation du condensateur par la résine. L'imprégnation est réalisée sous vide à la température 80°C et à une pression de 13,33 mbar (voir figure 2.7). L'imprégnation permet à la résine d'imprégner les différentes couches du condensateur par capillarité. Le temps d'imprégnation est d'environ 40 min.

À la fin de l'imprégnation, le moule est transféré dans un autoclave sous pression de 5 bar. Afin de réaliser la polymérisation de la résine, l'autoclave est placé dans un four industriel Despatch. Le cycle de polymérisation du mélange de résine est présenté à la Figure 2.6. À la fin du cycle de polymérisation, le refroidissement du condensateur n'est pas contrôlé.

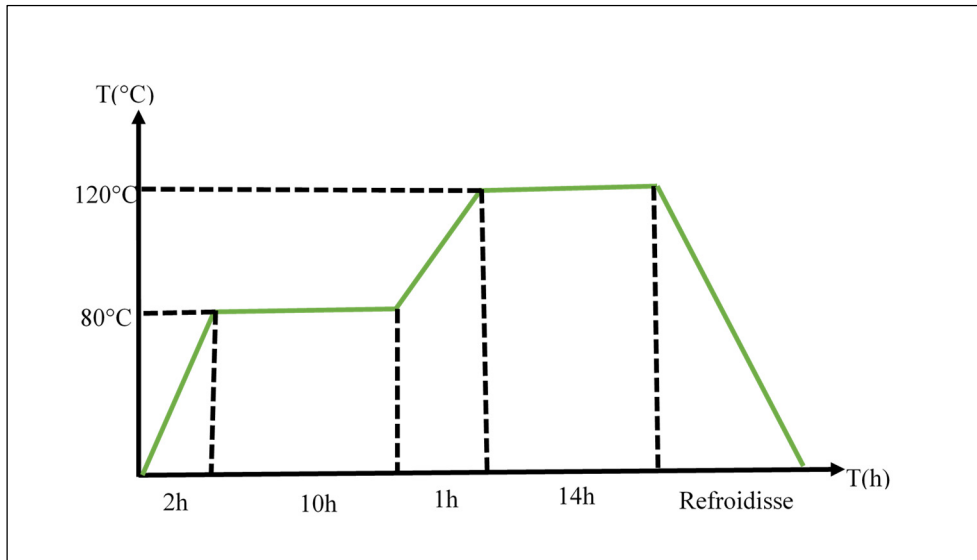


Figure 2.6 Cycle de polymérisation du mélange de résine

La figure 2.7 présente les étapes successives de la fabrication d'un condensateur sec par procédé VPI.

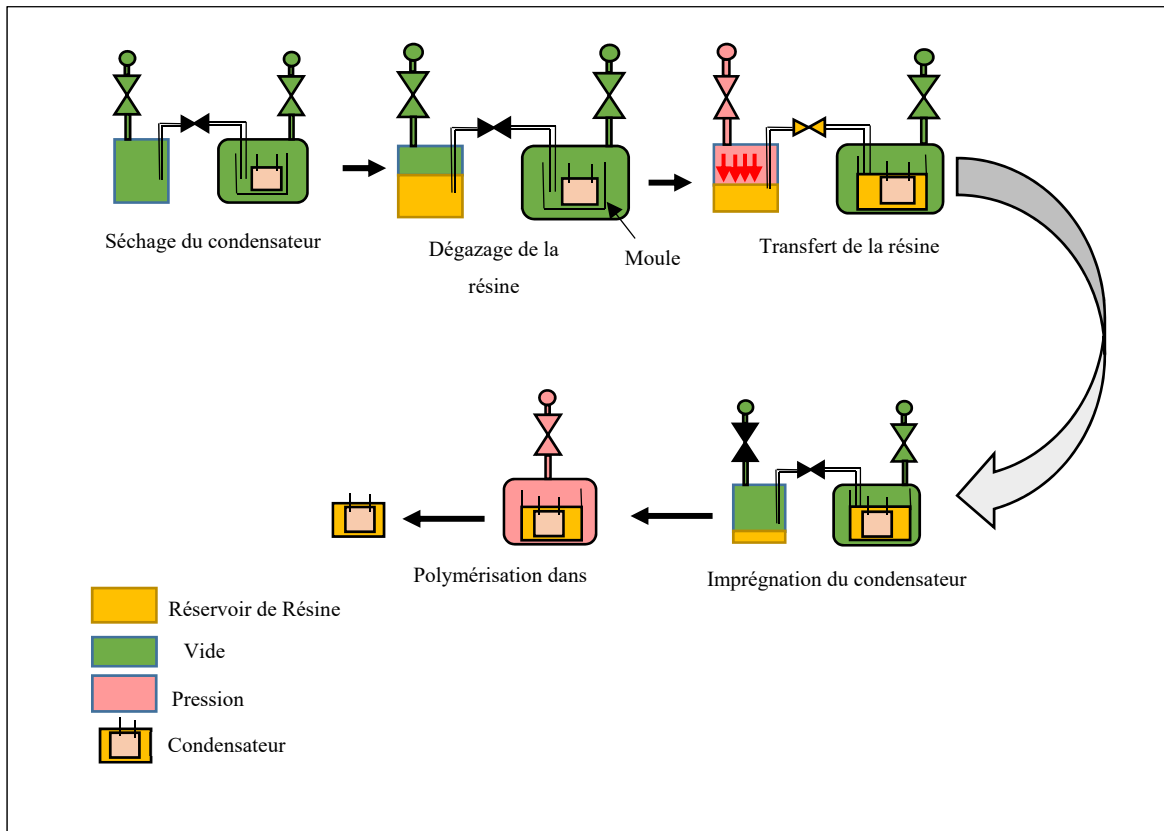


Figure 2.7 Étapes successives de la fabrication d'un condensateur sec

Chaque condensateur mono-bobine imprégné selon la procédure VPI est nommé en suivant la forme « VPI », suivi de l'ordre chronologique de fabrication du condensateur. Par exemple le VPI 71, a été fabriqué selon la procédure VPI et le numéro correspondant à son ordre chronologique de fabrication est 71.

Le tableau 2.1 est un récapitulatif des condensateurs fabriqués. La capacité mesurée sur les condensateurs avant et après imprégnation, l'augmentation de la capacité ainsi que le type d'imprégnant sont présentés dans le tableau 2.2

Tableau 2.1 Différentes technologies de condensateurs fabriqués



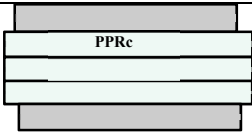


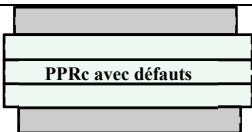

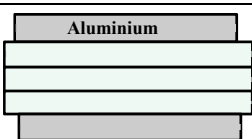
Condensateurs imprégnés de résine époxy sans défauts			
Condensateurs imprégnés de résine époxy avec défauts			
Condensateurs dans l'air sans défauts			

Tableau 2.2 Comparaison de différentes technologies de condensateurs

Condensateurs	Capacité mesurée avant imprégnation (nF)	Capacité mesurée après imprégnation (nF)	Augmentation de capacité (%)
Imprégnés de résine époxy sans défauts	52,5	65,7	25,1
Imprégnés de résine époxy avec défauts	53,8	66,7	24
Dans l'air (Sans défauts)	54,4	58 (après séchage du condensateur)	6,6

En comparant les résultats du tableau 2.2, on remarque que l'utilisation de la résine époxy dans le processus de fabrication des condensateurs VPI permet une augmentation de la capacité d'environ 25 %.

CHAPITRE 3

CARACTÉRISATION ÉLECTRIQUE ET DIÉLECTRIQUE DES CONDENSATEURS HAUTE-TENSION SEC

3.1 Étude de la rigidité diélectrique

La mesure de claquage diélectrique est une méthode de diagnostic destructive utilisée pour caractériser la rigidité diélectrique des matériaux. Le claquage ou rupture diélectrique est un phénomène destructeur irréversible dans l'isolation solide. Ce type de mesure est basé sur l'application d'un champ électrique (alternatif ou continu) croissant (en rampe ou en escalier, tout dépendamment de la procédure choisie) jusqu'à la rupture de l'isolant solide. Les mesures peuvent par exemple être effectuées avec un testeur d'huile utilisant de l'huile isolante dégazée pour éviter le contournement de l'échantillon. Pour effectuer les mesures, des électrodes sphériques peuvent être utilisées. Il est important de reconnaître que les tests doivent répondre à certaines normalisations. Par exemple la norme IEEE-Std-930 permet l'analyse statistique des données de tension de claquage (IEC/IEEE, 2007) et la méthode A « Short Test » de la norme (ASTM) D149 explique la procédure de réalisation des tests de claquage (D149, 2013). Le test de claquage définie par la procédure « Short Term » de la norme ASTM consiste à appliquer une tension linéairement croissante aux bornes du matériau diélectrique avec une vitesse typique jusqu'à sa rupture. Dans cette section, c'est cette méthode qui a été utilisée. Le champ de claquage est calculé en divisant la tension de claquage par l'épaisseur de l'échantillon. La norme IEEE-Std-930 et le modèle statistique de Weibull sont utilisés pour le traitement des données expérimentales. Le traitement statistique a été effectué en utilisant la loi de distribution de Weibull à deux paramètres (α et β) (IEC/IEEE, 2007) . L'expression de la probabilité cumulative de claquage de la distribution de Weibull avec deux paramètres est donnée par:

$$P(E) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (3.1)$$

où $P(E)$ représente la probabilité cumulative de claquage et E est la rigidité diélectrique expérimentale. Le facteur de forme β indique la dispersion des données tandis que le paramètre d'échelle α indique la rigidité diélectrique de l'échantillon pour une probabilité d'échec de 63,2%. C'est cette valeur qui est généralement considérée comme la rigidité diélectrique d'un matériau.

Les estimateurs de α et β sont calculées en utilisant la méthode de la vraisemblance maximale. En théorie, la détermination des probabilités d'occurrence de chaque mesure se fait grâce à la fonction $F(i, n)$ donnée par la formule suivante (IEC/IEEE, 2007):

$$F(i, n) = \frac{i - 0,44}{n + 0,25} * 100\% \quad (3.2)$$

où n est le nombre des échantillons testés et i désigne le rang des données dans l'ordre croissant des échantillons claqués. Il est à noter que les paramètres des mesures doivent être mis en ordre du plus petit au plus grand.

Les rigidités diélectriques de la résine époxy CY 192, du polypropylène traité corona (PPRc) et des condensateurs VPI ont été caractérisées afin de mieux connaître la rigidité diélectrique des différentes couches isolantes des condensateurs VPI.

3.1.1 Caractérisation électrique du film de polypropylène

Pour l'analyse de la rigidité du film PPRc, 20 échantillons ayant une épaisseur moyenne de 12,7 μm ont été prélevés (voir figure 3.1) et testés dans un bain d'huile diélectrique non dégazée selon la méthode A « Short Test » de la norme standard internationale de l'American Society for Testing and Material (ASTM) D149. Les données ont été traitées en utilisant la norme IEEE-Std- 930 de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). La rampe de tension pendant le test est de 5 kV/s. Les diagrammes de Weibull sont montrés à la Figure 3.2. Les traits en pointillé représentent les intervalles de confiance à 90% et les lignes droites

représentent la modélisation selon la loi de Weibull obtenue en utilisant la méthode de la vraisemblance maximale. Ces diagrammes sont tracés en utilisant le logiciel minitab.

La figure 3.1 présente le testeur de tension de claquage << BAUR>> utilisé lors des mesures de rigidité diélectrique du PPRc. Ce même banc d'essai a été utilisé pour le claquage de la résine époxy Hunstman (la résine n'a pas été claquée dans l'huile).

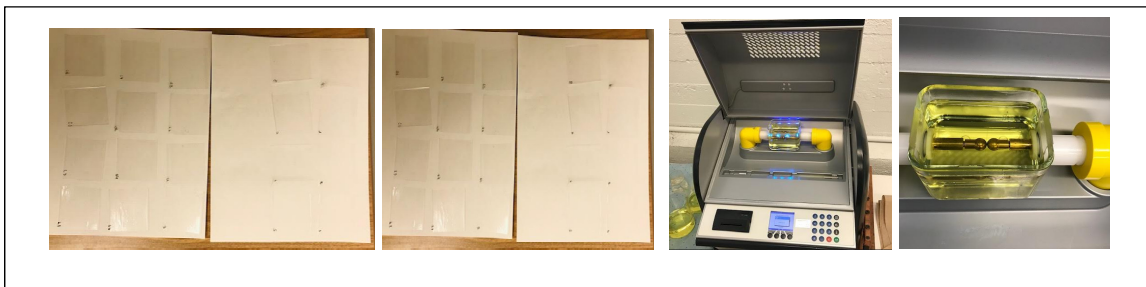


Figure 3.1 Banc d'essai des mesures de rigidité diélectrique du polypropylène

La figure 3.2 présente le diagramme de Weibull du polypropylène ayant une épaisseur de 12,7 μm .

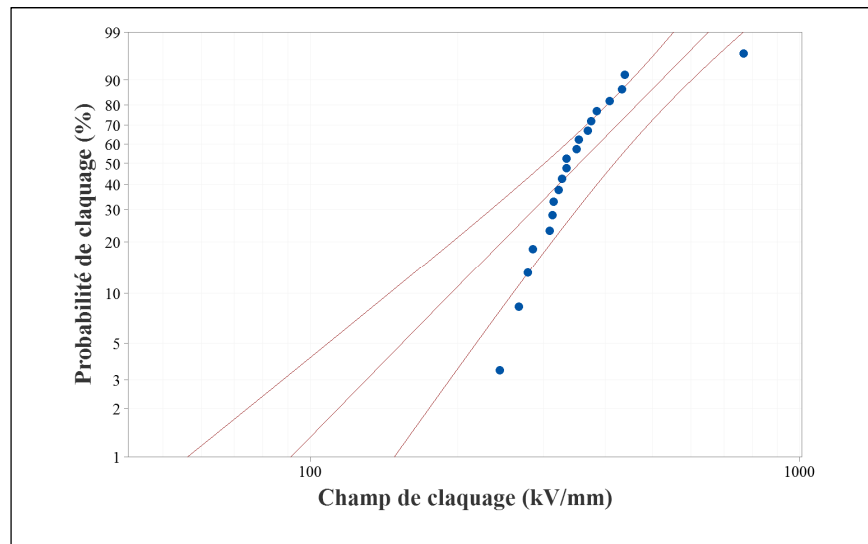


Figure 3.2 Diagramme de Weibull avec intervalles de confiance à 90% du PPRc

On constate que la rigidité diélectrique CA mesurée pour le PPRc est 400 kV/mm pour une probabilité de claquage de 63%. Cette valeur est faible par rapport aux valeurs relevées dans la littérature pour un film de BOPP (environ 700 kV/mm). Afin d'effectuer une comparaison, les mesures de rigidités diélectriques effectuées par Condis sur des échantillons de Polypropylène rugueux non traité corona (PPR) ayant une épaisseur de 12,7 μm est de 474,9 kV/mm. Cette différence entre les différentes valeurs de rigidité s'explique par le fait que la valeur exacte de la rigidité diélectrique dépend fortement de plusieurs facteurs dont: la procédure de mesure, l'épaisseur exacte des échantillons, le milieu environnant, la vitesse de montée de la tension, le type d'électrodes utilisées lors des mesures, etc. C'est pourquoi la valeur de la rigidité diélectrique varie considérablement d'une référence à l'autre.

3.1.2 Caractérisation électrique de la résine de 1,46 mm d'épaisseur

La figure 3.3 présente l'échantillon utilisé pour réaliser le claquage de la résine. La rampe de tension pendant les tests est de 5 kV/s.

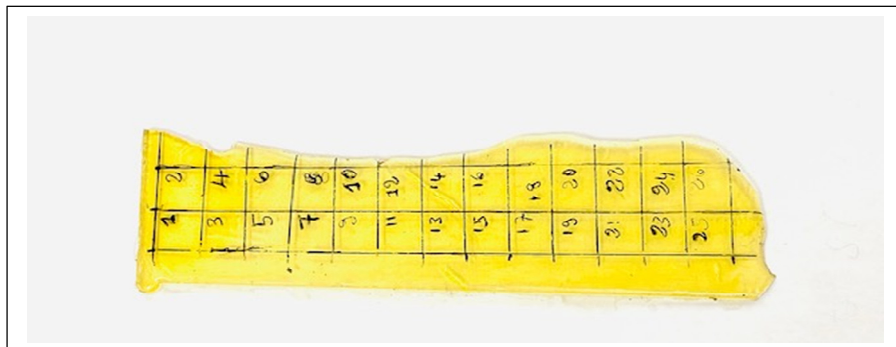


Figure 3.3 Résine époxy Hunstman avec accélérant

Le tableau 3.1 présente les données de claquages de la résine époxy Hunstman avec accélérant. Cette résine a une épaisseur moyenne de 1,46 mm.

Tableau 3.1 Résine avec accéléralant ayant une épaisseur moyenne de 1,46 mm

Échantillons	Tension de claquage (kV)	Champ de claquage (kV/mm)
1	14,7	10,1
2	13,5	9,3
3	17,9	12,3
4	14,4	9,9
5	19,7	13,5
6	12,9	8,8
7	21,0	14,4
8	8,8	6,0
9	19,3	13,2
10	12,3	8,4
11	19,2	13,2
12	10,9	7,5
13	5,9	4,0
14	4,6	3,2
15	14,2	9,7
16	10,7	7,3
17	23,0	15,8
18	21,1	14,5
19	24,6	16,8
20	18,1	12,4

La figure 3.4 présente le diagramme de Weibull avec intervalles de confiance à 90% de la résine ($e = 1,46$ mm).

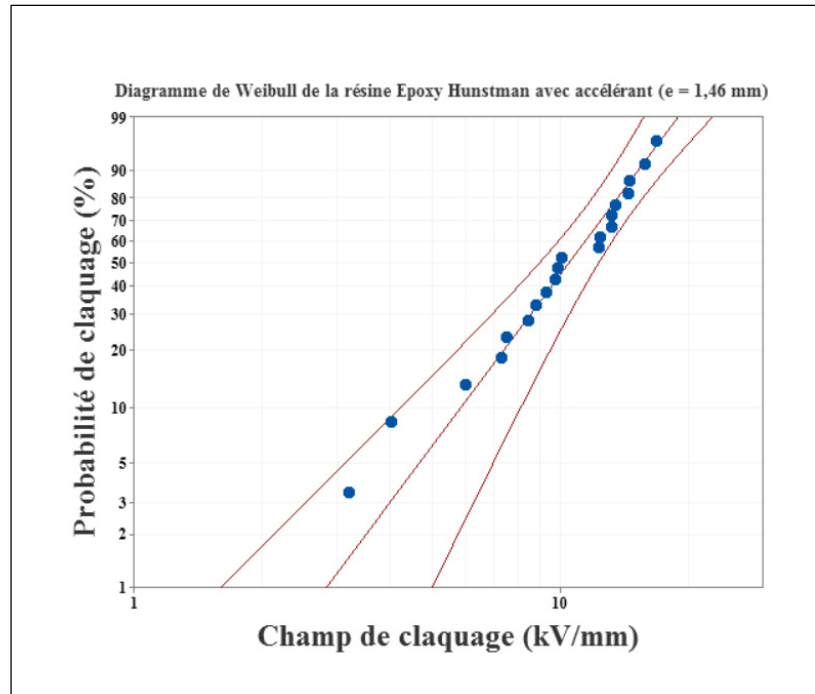


Figure 3.4 Diagramme de Weibull de la résine

La rigidité diélectrique mesurée de la résine époxy Hunstman avec accélérateur et ayant une épaisseur de 1,46 mm est 12 kV/mm pour une probabilité de claquage de 63%. Cette faible valeur de la rigidité diélectrique de la résine est due à son épaisseur qui est élevée. Comme expliqué dans le chapitre 1, plus l'épaisseur du mur isolant est élevée et plus la valeur de la rigidité diélectrique est faible.

3.1.3 Caractérisation électrique des condensateurs VPI

Dans cette partie, le banc d'essai de la figure 3.5 a été utilisé pour claquer les condensateurs VPI (ceux imprégnés de résine et dans l'air). La source d'alimentation haute tension utilisée, fournit une tension sinusoïdale. Il provient du fabricant Phenix Technologies et est de type 600CE 50 kV/165 mA/60 Hz. La montée en tension de la source est ajustable. Lors des mesures de claquages, 333 V/s est utilisé comme valeur par défaut de montée en tension.

La Figure 3.5 présente le schéma de raccordement pour la mesure des tensions de claquage ainsi que la mesure de l'activité de DP.

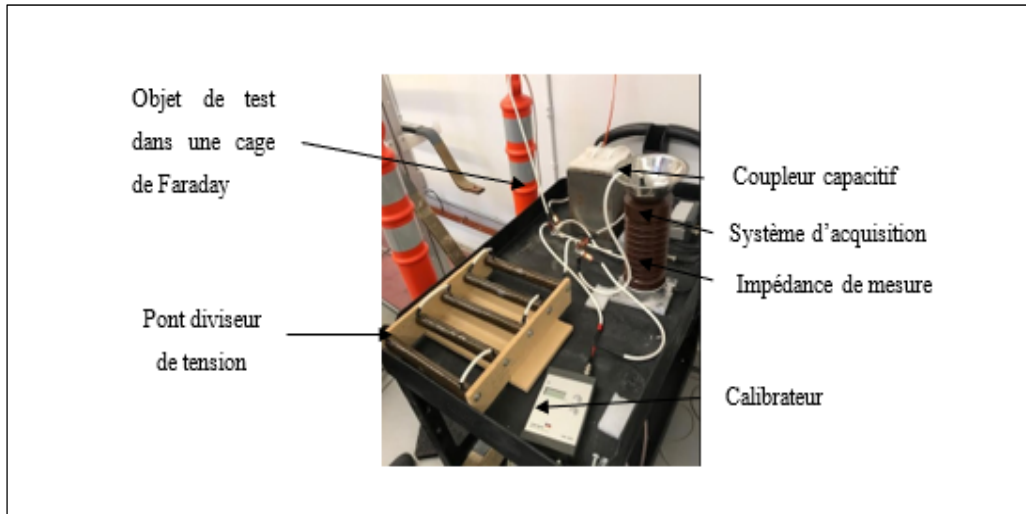


Figure 3.5 Banc d'essai pour les mesures de claquage et de DP

Pour réaliser le claquage, les condensateurs ont été soumis à une rampe de tension jusqu'à 20 kV. Le pont diviseur de tension (la résistance série) sur la Figure 3.5 est utilisé afin de pouvoir appliquer une tension de 1,5 kV aux bornes du condensateur VPI car la plus basse tension que la source de tension peut fournir est de 2,5 kV.

La figure 3.6 présente les images des condensateurs imprégnés de résine.

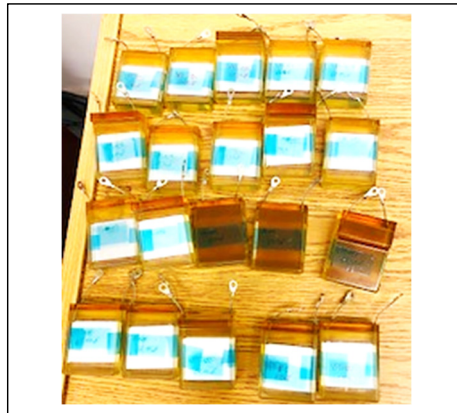


Figure 3.6 Condensateurs imprégnés de résine

Le tableau 3.2 présente les données de claquages des condensateurs imprégnés de résine ayant une épaisseur de mur diélectrique de 0,0397 mm. Tel qu'on peut l'observer sur le tableau 3.2, sur les 20 échantillons testés, 17 ont claqué lorsque la tension maximale de l'essai a été atteinte. Tous les échantillons n'ont pas la même couleur car le papier a été utilisée à la surface de certains condensateur afin de pouvoir réaliser un compactage qui permet d'obtenir la même capacité dans tous les condensateurs. C'est du papier naturel qui a été utilisé.

Tableau 3.2 Bobines imprégnées de résine

Échantillons	Capacité (nF)	Ubd (kV)	Ebd (kV/mm)
1	66,84	5,92	149,12
2	67,09	6,32	159,19
3	67,21	Non claqué (Censuré)	-
4	67,04	6,02	151,64
5	67,19	6,09	153,40
6	67,15	6,43	161,96
7	67,36	6,12	154,16
8	67,20	6,13	154,41
9	66,99	6,47	162,97
10	67,1	6,15	154,91
11	67,4	5,78	145,59
12	67,3	6,43	161,96
13	67,20	5,98	150,63
14	67,33	6,17	155,42

Tableau 3.2 Bobines imprégnées de résine (suite)

Échantillons	Capacité (nF)	Ubd (kV)	Ebd (kV/mm)
15	67,36	6,32	159,19
16	67,10	5,99	150,88
17	66,95	6,18	155,67
18	67,14	Non claqué (Censuré)	-
19	67,7	Non claqué (Censuré)	-
20	67,5	6,00	151,13

La figure 3.7 présente le diagramme de Weibull du condensateur imprégné de résine ayant une épaisseur de 0,0397 mm

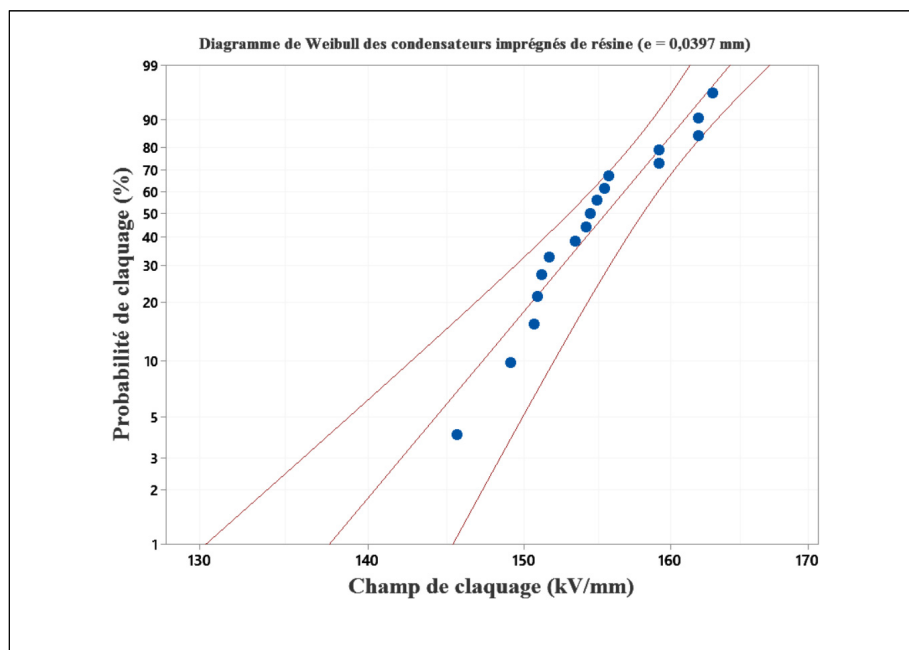


Figure 3.7 Diagramme de Weibull du condensateur imprégnés de résine

La rigidité diélectrique mesurée pour le condensateur imprégné de résine ayant une épaisseur de 0,0397 mm est 157 kV/mm pour une probabilité de claquage de 63%.

La mesure de la rigidité diélectrique a été réalisée sur des condensateurs non imprégnés de résine dont la capacité finale est de 54,1 nF (cette capacité est celle mesurée avant imprégnation dans les condensateurs imprégnés de résine). La figure 3.9 présente les images de quelques condensateurs non imprégnés de résine.



Figure 3.8 Condensateurs non imprégnés de résine

Le tableau 3.3 présente les données de claquages des condensateurs non imprégnés de résine ayant une épaisseur de 0,0381 mm et dont la capacité est environ 54,1 nF.

Tableau 3.3 Bobines non imprégnées de résine avec ($\epsilon = 0,0381$ mm, $C = 54,1$ nF)

Échantillons	Capacité (nF)	Ubd (kV)	Ebd (kV/mm)
1	54,1	5,64	148,03
2	54,0	5,38	141,21
3	54,1	5,32	139,63
4	54,0	5,54	145,41
5	54,1	5,43	142,52
6	54,1	5,13	134,65
7	54,1	5,70	149,61
8	54,1	5,42	142,26
9	54,0	5,66	148,56
10	54,1	5,43	142,52
11	54,1	5,98	156,96
12	54,1	4,80	125,98
13	54,1	5,47	143,57
14	54,1	5,81	152,49
15	54,1	5,33	139,90
16	54,1	5,34	140,16
17	54,1	5,15	135,17
18	54,1	5,34	140,16
19	54,1	5,62	147,51
20	54,1	4,70	123,36

La figure 3.9 présente le diagramme de Weibull des condensateurs non imprégnés ayant une épaisseur de 0,0381 mm et dont la capacité est de 54,1 nF.

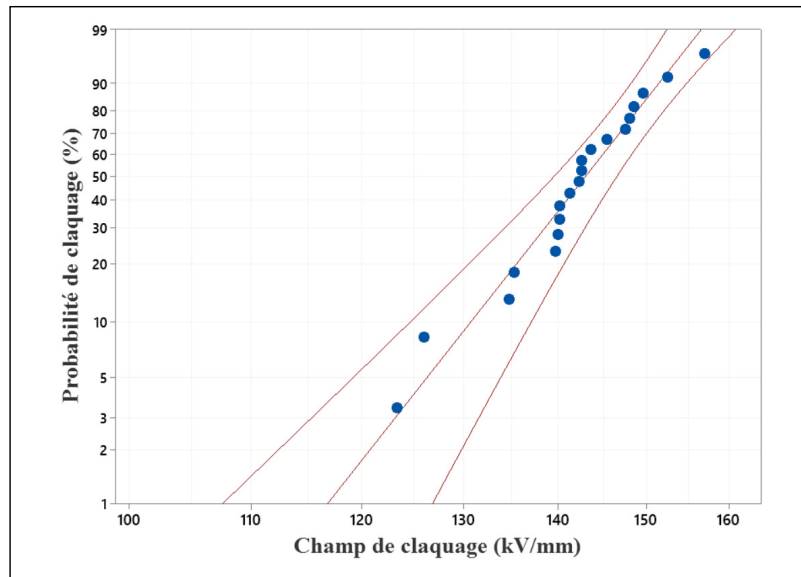


Figure 3.9 Diagramme de Weibull des condensateurs non imprégnés

La rigidité diélectrique mesurée pour les condensateurs non imprégnés dont la capacité finale est de 54,1 nF et ayant une épaisseur de 0,0381 mm est 146 kV/mm pour une probabilité de claquage de 63%.

Afin de vérifier si l'augmentation de la capacité influe sur la rigidité diélectrique des condensateurs et afin de faire une comparaison avec la capacité finale des condensateurs imprégnés de résines, les mesures de rigidité diélectrique ont été réalisées sur quelques condensateurs dans l'air ayant une capacité finale de 67,1 nF après compaction (cette capacité est équivalente à celle des bobines imprégnées). Le tableau 3.4 présente les données de claquages des condensateurs non imprégnés (sans epoxy) ayant une épaisseur de 0,0381 mm et dont la capacité est environ 67,1 nF. Il est à noter que sur les 28 échantillons testés, seulement 15 échantillons ont claqué. Les condensateurs n'ont pas claqué car la limite de courant est atteinte plus vite à cause de l'augmentation de la capacité.

Tableau 3.4 Bobines dans l'air avec $e = 0,0381$ mm, $C = 67,1$ nF

Échantillons	Capacité (nF)	Ubd (kV)	Ebd (kV/mm)
1	67,0	5,53	145,14
2	67,0	Non claqué (Censuré)	-
3	67,3	Non claqué (Censuré)	-
4	67,1	Non claqué (Censuré)	-
5	67,3	Non claqué (Censuré)	-
6	67,1	5,67	148,82
7	67,1	5,27	138,32
8	67,0	Non claqué (Censuré)	
9	67,1	5,44	142,78
10	67,1	5,26	138,06
11	67,1	Non claqué (Censuré)	-
12	67,1	Non claqué (Censuré)	-
13	67,1	5,38	141,21
14	67,0	Non claqué (Censuré)	-
15	67,0	Non claqué (Censuré)	-
16	67,1	Non claqué (Censuré)	-
17	67,1	5,39	141,47
18	67,1	5,16	135,43
19	67,1	5,33	139,90
20	67,0	5,44	142,78
21	67,0	5,54	145,41
22	67,1	5,52	144,88
23	67,1	Non claqué (Censuré)	-
24	67,1	5,15	135,17
25	67,1	Non claqué (Censuré)	-
26	67,1	5,15	135,17
27	67,1	Non claqué (Censuré)	-
28	67,1	5,03	132,02

La figure 3.10 présente le diagramme de Weibull des condensateurs non imprégnés de résine ayant une épaisseur de 0,0381 mm et une capacité d'environ 67,1 nF.

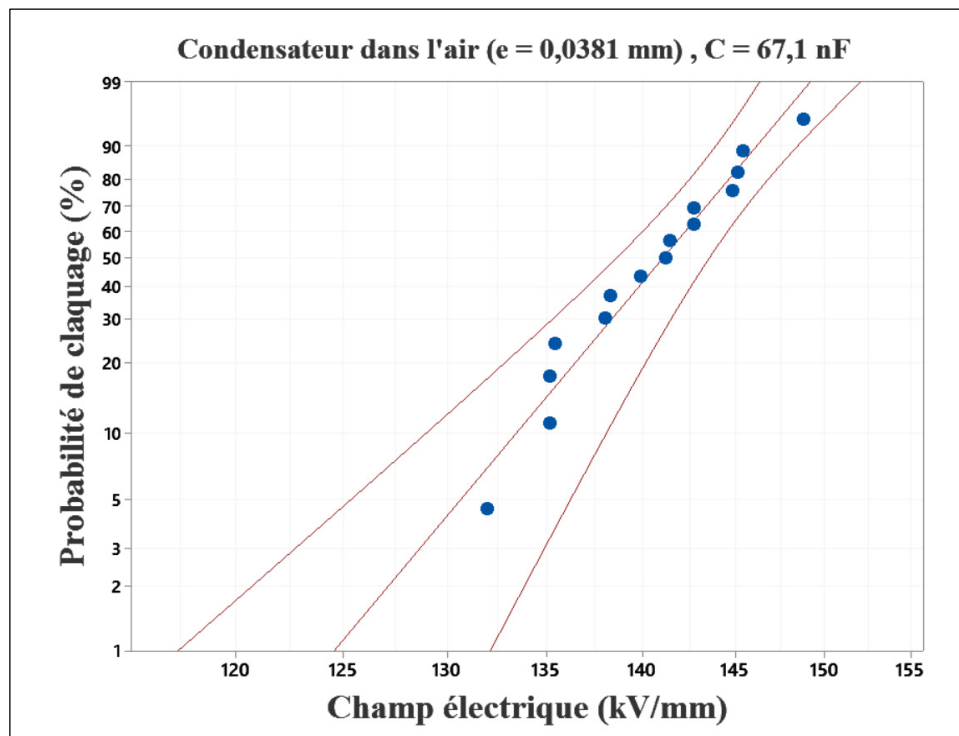


Figure 3.10 Diagramme de Weibull des condensateurs non imprégnés ($C=67,1$ nF)

La rigidité diélectrique mesurée pour les condensateurs non imprégnés dont la capacité finale est de 67,1 nF et ayant une épaisseur de 0,0381 mm est 143 kV/mm pour une probabilité de claquage de 63%.

Les figure 3.11 et 3.12 présentent le point de claquage des condensateurs non imprégné et imprégné et non imprégnés de résine époxy.

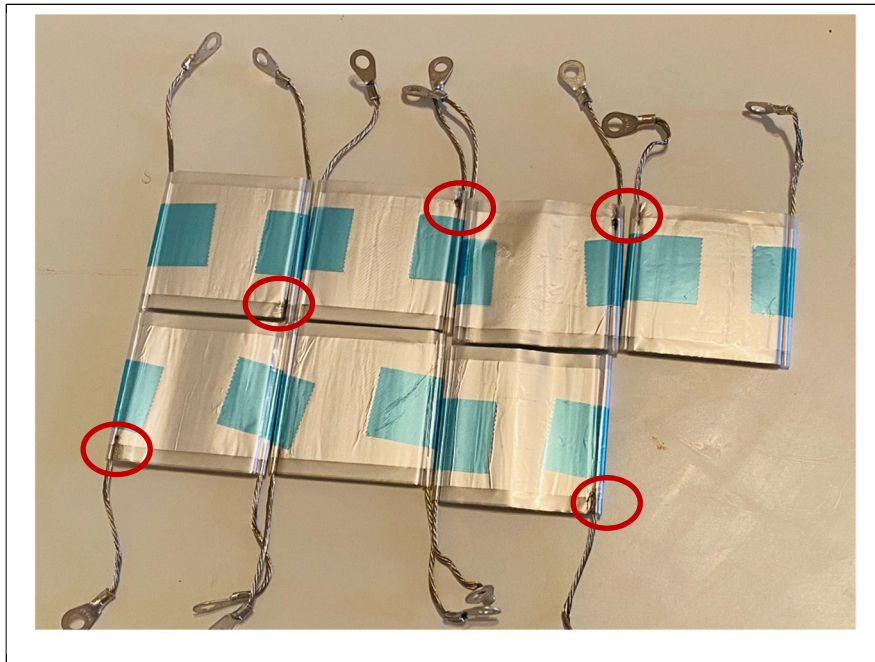


Figure 3.11 Point de claquage des condensateurs non imprégnés de résine époxy

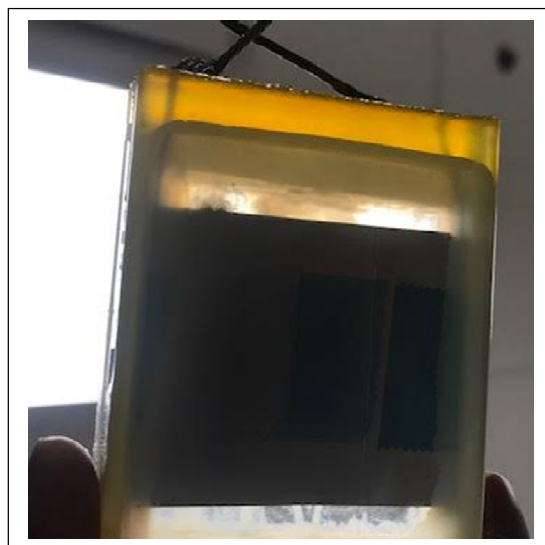


Figure 3.12 Point de claquage des condensateurs imprégnés de résine époxy

On peut donc conclure que la rigidité diélectrique mesurée pour les condensateurs non imprégnés se situe entre 143 kV/mm et 146 kV/mm pour une probabilité de claquage de 63%. Nous pouvons remarquer que l'augmentation de la compaction (et donc de la capacité) des condensateurs non imprégnés n'influe que très peu sur la rigidité diélectrique des condensateurs non imprégnés.

La rigidité diélectrique du polypropylène traité corona ayant une épaisseur de 12,7 μm est 400 kV/mm, celle de la résine époxy Hunstman avec accélérateur dont l'épaisseur moyenne est de 1,46 mm est 12 kV/mm, celle des condensateurs imprégnés de résine se situe entre 157 kV/mm et 164 kV/mm et celle des condensateurs dans l'air se situe entre 143 kV/mm et 146 kV/mm. Avec l'utilisation de la résine, nous avons une augmentation de la rigidité diélectrique qui se situe entre 9% et 11% (l'utilisation de la résine n'augmente pas de façon significative la rigidité diélectrique du mur isolant). Nous pouvons conclure que l'utilisation de la résine ne permet pas d'améliorer significativement la rigidité diélectrique. Comme on peut le remarquer sur les figures 3.11 et 3.12, les condensateurs imprégnés et non imprégnés ont claqués au niveau des connexions électriques et aux extrémités des électrodes car le champ électrique est élevé aux bords des électrodes. Afin d'éviter le claquage des condensateurs aux extrémités des électrodes et aux niveaux des connexions électriques, nous recommandons d'utiliser d'autres géométries d'électrodes pour les travaux futurs qui pourront réduire le champ électrique à ces endroits.

3.2 Caractérisation diélectrique de la résine époxy

La caractérisation diélectrique des condensateurs fabriqués est réalisée par spectroscopie diélectrique. La spectroscopie est une technique de caractérisation permettant d'évaluer la qualité des isolants électriques et de diagnostiquer le type de polarisation. Cette technique non destructive permet d'étudier les propriétés diélectriques d'un matériau comme la conductivité et la permittivité complexe. La procédure de la caractérisation consiste à mesurer l'impédance complexe d'un condensateur dont l'espace entre les électrodes est le matériau à analyser. Dans ce travail, la capacité et la tangente de l'angle de perte, $\tan(\delta)$, des condensateurs sont mesurés

sur une plage de fréquence de 0,1 Hz à 3×10^5 Hz. La fréquence cible est de 50 Hz ou 60 Hz. Les mesures ont été menées à l'aide d'un spectromètre diélectrique à large bande de la compagnie Novocontrol pour des températures allant de 25°C à 140°C à tous les 5°C pour chaque spectre isotherme pour la résine et à la température de la pièce seulement dans le domaine fréquentiel pour les condensateurs VPI. La figure 3.11 illustre le banc d'essai permettant de réaliser les mesures de spectroscopie diélectrique. Le principe de la spectroscopie diélectrique repose sur l'application d'une tension sinusoïdale aux bornes de l'échantillon et sur la mesure de l'amplitude et du déphasage (par rapport à la tension) du courant. Les paramètres géométriques fournis au logiciel de contrôle lui permettent ensuite de calculer les propriétés du matériau testé (la permittivité complexe). La figure 3.12 montre le principe de mesure en spectroscopie diélectrique.

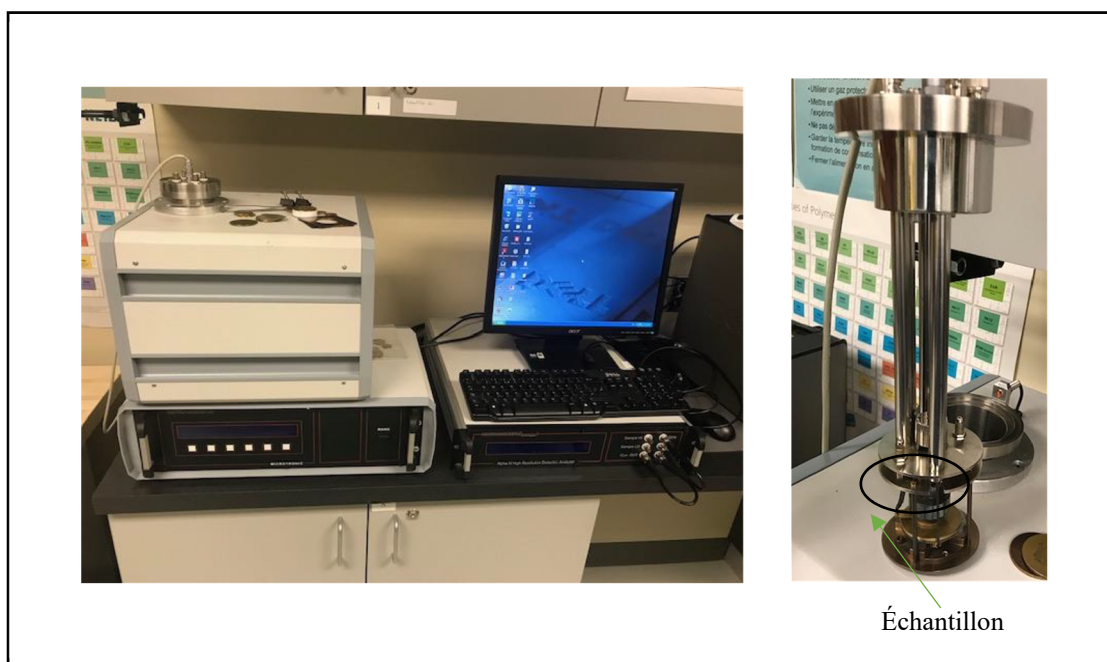


Figure 3.13 Banc d'essai des mesures de spectroscopie et le porte échantillon

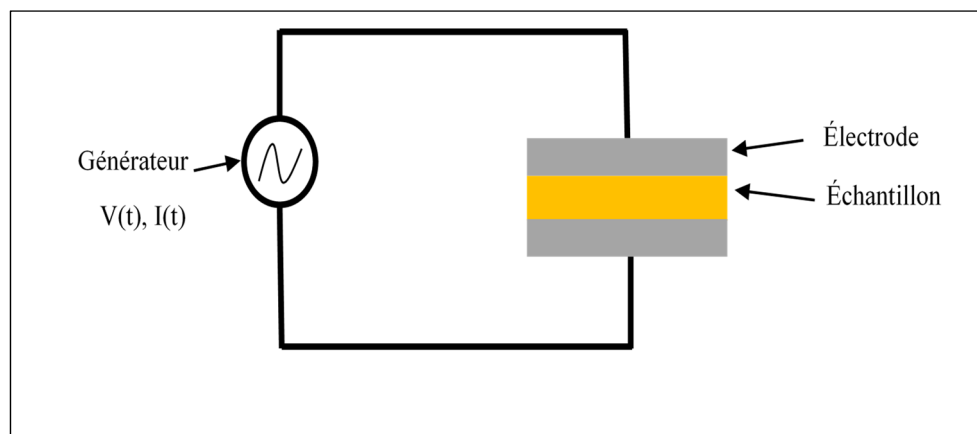


Figure 3.14 Principe de mesure en spectroscopie diélectrique

Le rapport des amplitudes tension/courant définit le module de l'impédance $|Z|$; le déphasage entre la tension et le courant complète l'information pour donner accès aux parties réelle et imaginaire de l'impédance complexe Z^* . Pour la caractérisation diélectrique, l'échantillon a été inséré entre deux électrodes circulaires (géométrie plan-plan), aux bornes auxquelles une tension CA de 3V a été appliquée. Les électrodes utilisées se présentent sous forme de disques de 40 mm de diamètre et 2 mm d'épaisseur. Les résultats obtenus ont été utilisés pour tracer les courbes en 3D des figures 3.15 à 3.17. Les figures 3.15 à 3.17 illustrent respectivement les courbes représentant la tangente de l'angle de perte, la permittivité imaginaire et la permittivité réelle du mélange de résine utilisé dans la fabrication des condensateurs VPI.

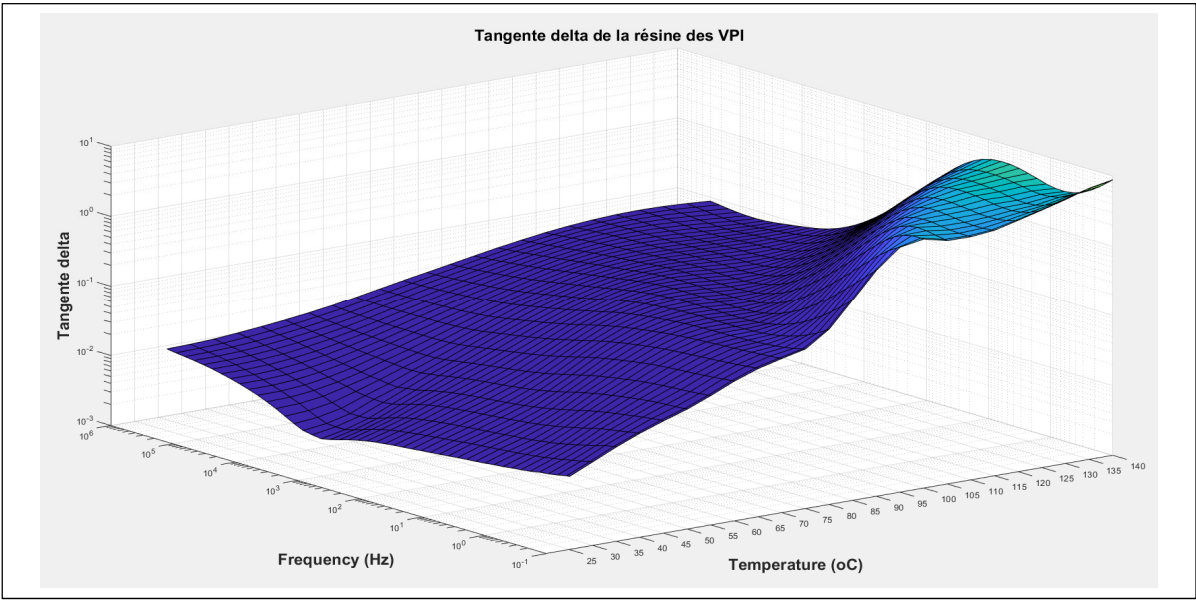


Figure 3.15 Tangente de l’angle de perte de la résine

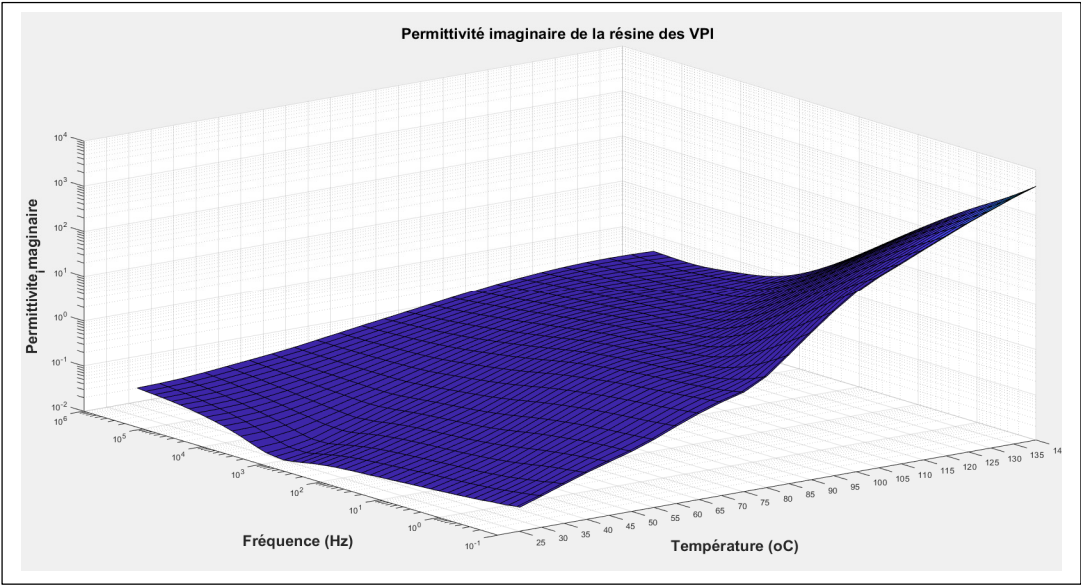


Figure 3.16 Permittivité imaginaire de la résine

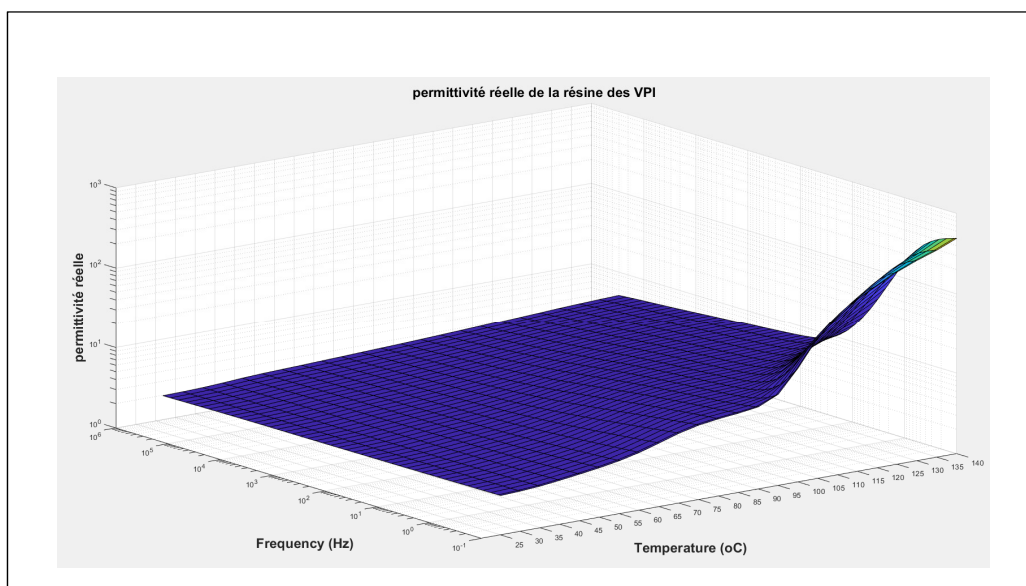


Figure 3.17 Permittivité réelle de la résine

Sur la figure 3.15, on note la présence de plusieurs pics. Ces pics proviennent des mécanismes de relaxation qui se produisent dans la résine. Ces processus de relaxation dus au mouvement des groupes de dipôles comme les molécules ou les segments des chaînes, apparaissent dans le spectre sous la forme de pics dans les courbes isochrones ou isothermes ($\epsilon''(\omega)$), soit en fonction de la température à fréquence fixe ou en fonction de la fréquence à température fixe, caractérisant les pertes diélectriques du matériau. En effet, ces spectres de relaxation diélectrique permettent de déterminer des mouvements de chaîne en les comparant à différentes températures et fréquences. Ils permettent aussi, dans certains cas, de déterminer d'autres caractéristiques du matériau. Dans un polymère, on trouve des petites molécules (CH_3 , F, OH, etc...), des molécules plus grosses, des chaînes plus ou moins longues, des terminaisons de chaînes, des squelettes macromoléculaires. Chaque groupe chimique a un moment dipolaire propre et des interactions sont également possibles entre ces entités et peuvent donc être à l'origine de phénomènes de relaxation diélectrique, identifiés traditionnellement par des lettres grecques en ordre d'apparition de la température la plus élevée à la plus basse dans un diagramme isochrone (α , β , ...). Sur les figures 3.15 et 3.16,

nous pouvons remarquer la présence d'un mécanisme de relaxation entre les fréquences de 1 à 10 (Hz) à des températures de 70 à 100°C qui se traduit par l'apparition d'un pic d'amplitude faible. On peut associer cette relaxation diélectrique, à la relaxation α . L'autre processus diélectrique apparaissant vers les hautes fréquences est nommé la relaxation β . Elle est une caractéristique spécifique de l'état amorphe. Elle résulte de fluctuations rotationnelles du vecteur représentatif du moment dipolaire et correspond à un processus local situé dans la phase amorphe. Sur les figures 3.15 et 3.16, on remarque la présence du mécanisme de la relaxation β en haute fréquence. Sur les figures 3.15 et 3.16, on peut observer, qu'aux plus basses fréquences, il y a une augmentation des pertes quand la fréquence diminue en raison de l'apparition du phénomène de conduction. On peut donc penser que dans la gamme des basses fréquences et des hautes températures, on a la manifestation d'une certaine conductivité.

3.3 Mesure et analyse des décharges partielles (DP)

Différents types de systèmes d'isolation sont utilisés dans les condensateurs haute tension et la présence de défauts dans la paroi isolante peut entraîner une dégradation de l'équipement électrique. Pour une meilleure efficacité en fonctionnement continu des condensateurs, la paroi isolante doit être maintenue en bon état. La présence de décharges partielles (DP) est considérée comme l'une des principales causes d'initiation de la dégradation du mur isolant. La DP est un phénomène qui se produit dans les défauts de type cavité (fissures, délamination et bulles d'air) existant dans la paroi isolante, lorsque le champ de claquage du gaz à l'intérieur du défaut est dépassé (H. Illias, Altamimi, Mokhtar, & Arof, 2016). Étant une technique de contrôle non destructif, elle permet l'analyse, l'identification et la classification des types de DP, c'est donc un outil important pour évaluer la qualité de la paroi isolante des condensateurs haute tension (Sahoo, Salama, & Bartnikas, 2005).

Dans ce travail, nous nous limiterons à l'usage de coupleur capacitifs pour mesurer les impulsions de DP. La méthode utilisant le coupleur capacitif vise à détecter les impulsions rapides de courant (de l'ordre de quelques nanosecondes) dues aux transferts de charges provoqués par l'activité des décharges partielles. La méthode consiste à monter les

condensateurs fabriqués, en parallèle avec le coupleur capacitif. Les décharges partielles (DP) sont mesurées à l'aide d'un système d'acquisition MDP600 d'OMICRON mtronix technology. Le système, présenté à la figure 3.5 est utilisé pour mesurer les DP dans les condensateurs VPI. Il est constitué d'un calibrateur CAL 542 permettant d'étalonner la charge, d'un pont diviseur de tension, d'un système d'acquisition MDP600, d'un quadripôle CPL 542, d'un système de transmission par fibre optique et d'un convertisseur optique/numérique MCU 502. Le calibrateur est branché en parallèle avec le condensateur lors de l'étape de la calibration. Le condensateur de couplage a une valeur de 1 nF. Le pont diviseur de tension de 50 k Ω est connecté en parallèle avec le condensateur de couplage et est en série l'objet de test. Le quadripôle CPL 542 transforme le courant d'entrée des décharges partielles en une tension de sortie qui sera transmise au système d'acquisition. Le convertisseur MCU 502 permet d'isoler la zone de test électrique (haute tension) de la zone sécurisée où les données sont analysées. Le système de mesure des décharges partielle est calibré à 50 pC. Les impulsions de décharges partielles enregistrées par le système permettent de mesurer la charge apparente de DP, la tension instantanée correspondante à chaque DP, l'instant de l'occurrence des DP et la position dans la phase de chaque DP. Les codes de couleurs sur les différentes figures représente l'intensité des décharges partielles. La mesure des DP permet de s'assurer que les condensateurs fabriqués sont dépourvus de cavités, de vides ou de délaminations. Une apparition de DP endommagerait le mur diélectrique en fonctionnement continu et ne peut donc pas être acceptée pour un échantillon de bonne qualité.

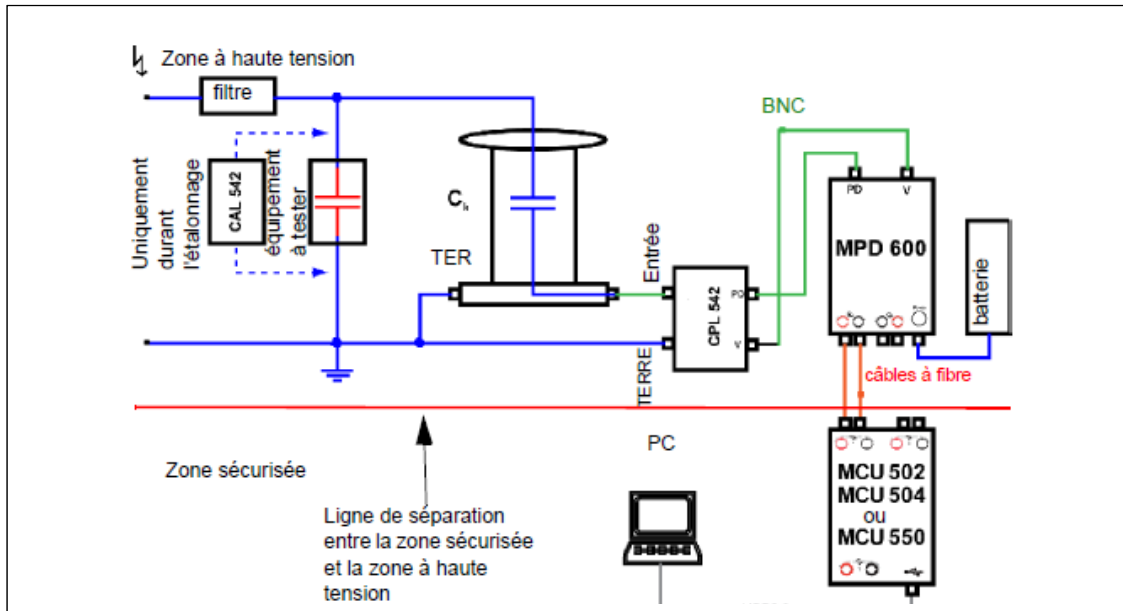


Figure 3.18 Schéma de raccordement pour la mesure des DP
Tirée de Omicron (2013)

La source d'alimentation haute tension utilisée fournit une tension sinusoïdale. Il provient du fabricant Phenix Technologies et est de type 600CE 50 kV/165 mA/60 Hz. La montée en tension de la source est ajustable. Dans ce travail, 333 V/s est utilisé comme valeur par défaut de montée en tension lors des mesures de DP. Les mesures sont réalisées dans le domaine fréquentiel dont la fréquence centrale est de 300 kHz et la bande passante de 300 kHz. L'acquisition des DP est réalisée pendant 1 minute. Les données statistiques des DP sont recueillis sur une période. Ces données, permettent de comparer la charge apparente, la charge apparente moyenne, le nombre, le courant et la puissance électrique des DP. L'analyse de ces données statistiques permettent aussi d'identifier les profils de DP.

Les DP ont été mesurées sur les condensateurs à des champs électriques de 40 kV/mm (correspondant à une tension électrique de 1,5 kV aux bornes du condensateur) et 60 kV/mm (correspondant à une tension électrique de 2,3 kV aux bornes du condensateur). Les événements de décharges sont positionnés dans l'histogramme par rapport à la phase. Les

histogrammes de décharges partielles des condensateurs imprégnés de résine et dans l'air sont illustrés sur les figures 3.19 à 3.22. Les données statistiques des mesures de décharges partielles sont présentées dans les tableaux 3.6 et 3.7.

Les tableaux 3.6 et 3.7 présentent les valeurs de la charge apparente Q_{IEC} des mesures de DP à 40 kV/mm et à 60 kV/mm. La charge apparente selon la norme IEC 60270, est une charge, si elle est remplacée par l'objet de test, dans le système de mesure des PD, en un temps très réduite, produira les mêmes courants de décharges partielles. Pour comparer l'évolution de la DP, après un premier étalonnage, une première mesure à 0 V est effectuée pour évaluer le niveau du bruit de fond (BGN). Ensuite, les échantillons sont soumis à une tension alternative appliquée équivalente à un champ électrique de 40 et 60 kV/mm entre les électrodes du condensateur haute tension sec. En comparant les valeurs des tableaux 3.6 et 3.7 des différentes configurations de condensateurs, on peut remarquer que le niveau de DP dans les condensateurs imprégnés de résine est resté au niveau du bruit de fond tandis celui des condensateurs dans non imprégnés est très élevé par rapport aux condensateurs imprégnés. En comparant les histogrammes des DP et les données statiques des DP, on note que l'usage de la résine thermodurcissable a permis une diminution significative du niveau de DP. Il est à notifier que la majorité des condensateurs VPI imprégnés de résine, sont exempts de DP mais dans quelques cas, il y a eu des défauts de fabrication.

La figure 3.19 et 3.20 présentent respectivement l'histogramme des DP à 40 kV/mm et 60 kV/mm des condensateurs imprégnés de résine à 60 Hz.

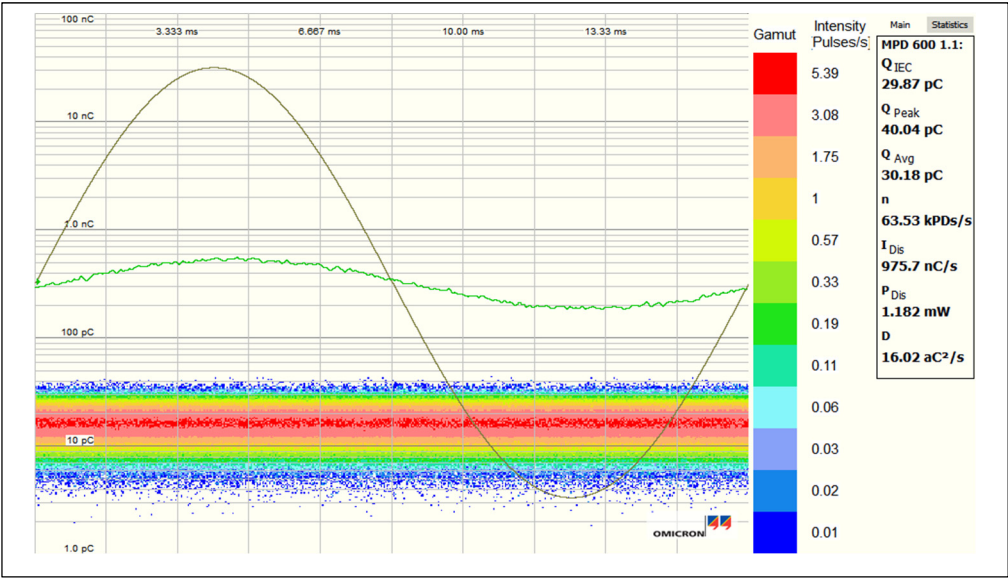


Figure 3.19 Histogramme des DP à 40 kV/mm
des condensateurs imprégnés de résine

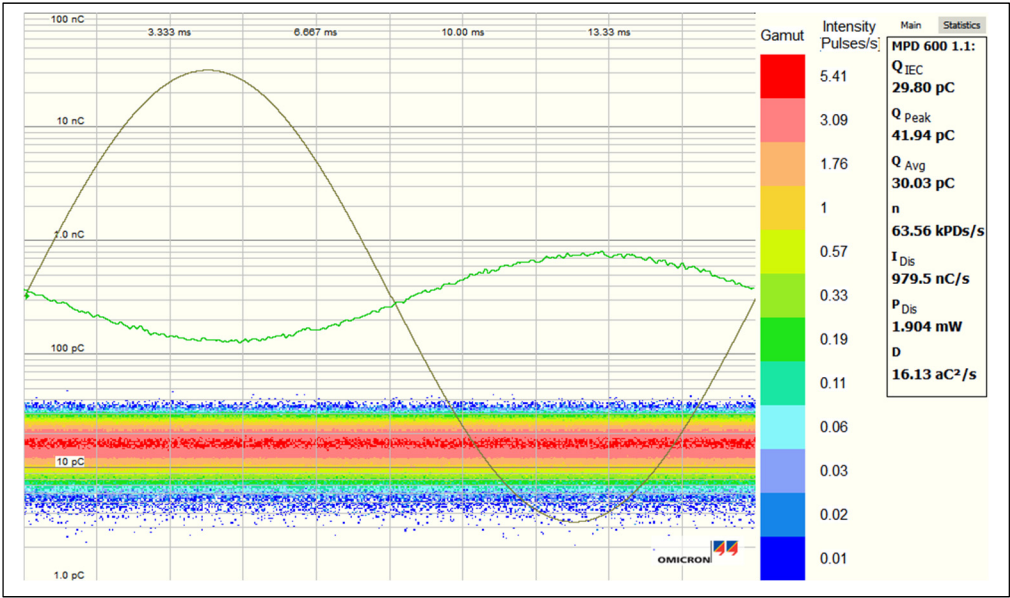


Figure 3.20 Histogramme des DP à 60 kV/mm
des condensateurs imprégnés de résine

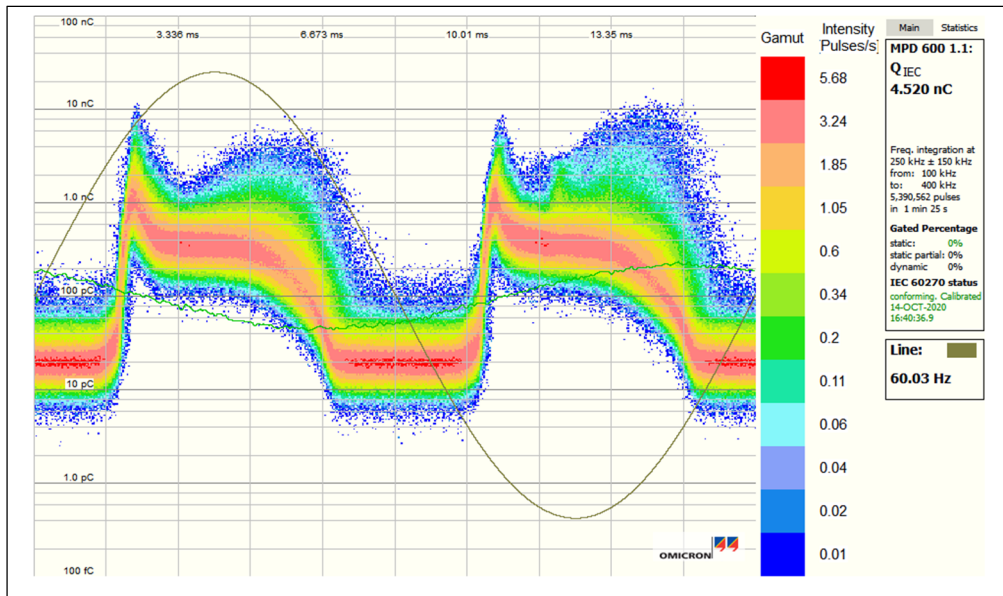


Figure 3.21 Histogramme des DP à 40 kV/mm
des condensateurs non imprégnés

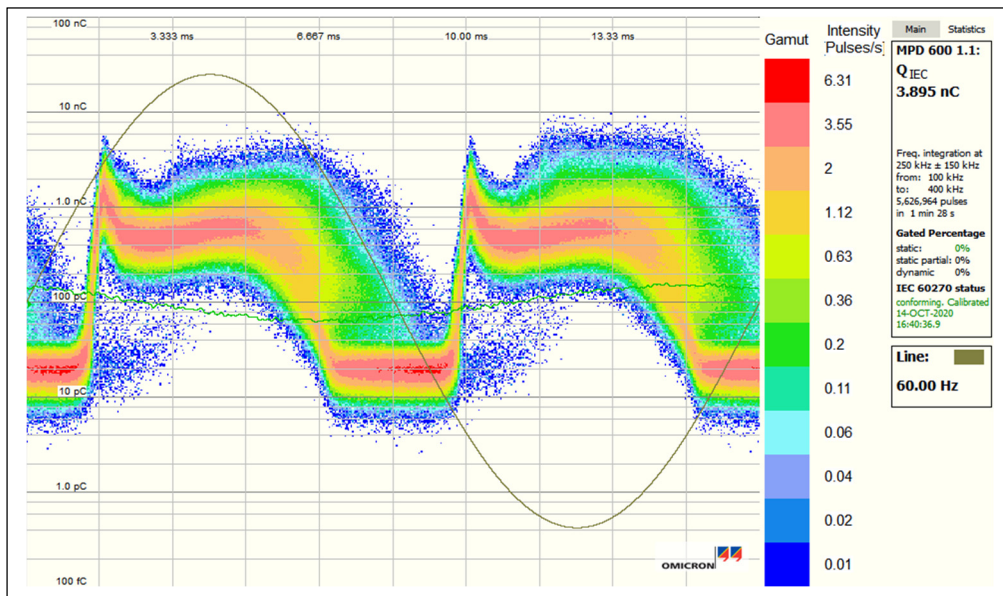


Figure 3.22 Histogramme des DP à 60 kV/mm
des condensateurs non imprégné de résine

Tableau 3.5 Charge apparente Q_{IEC} @ 40 kV/mm (pC) et à 60 Hz

Condensateurs imprégnés de résine	29,9
Condensateur dans l'air	4520

Tableau 3.6 Charge apparente Q_{IEC} @ 60 kV/mm (pC) et à 60 Hz

Condensateurs imprégnés de résine	29,8
Condensateur dans l'air	3895

3.4 Comparaison de deux technologies de condensateur : film traité corona et non

Les mesures de décharges partielles (DP) ont été effectuées sur des condensateurs utilisant trois films de polypropylène non traité corona (PPR) et traité corona (PPRc). Le traitement corona est une forte oxydation de la surface d'un matériau. L'oxydation des molécules de surface permet d'augmenter la tension de surface du film et améliore ainsi l'adhésion, le collage entre la résine et le film. L'objectif de cette étude est de comparer les performances électriques de ces condensateurs ainsi que de vérifier l'amélioration apportée par l'usage du traitement corona dans le processus de fabrication des condensateurs haute-tension sec fabriqué selon la procédure VPI.

Les figures 3.23 et 3.24 présentent les histogrammes des décharges partielles à 40 kV/mm et à 60 Hz de ces différents types de condensateur.

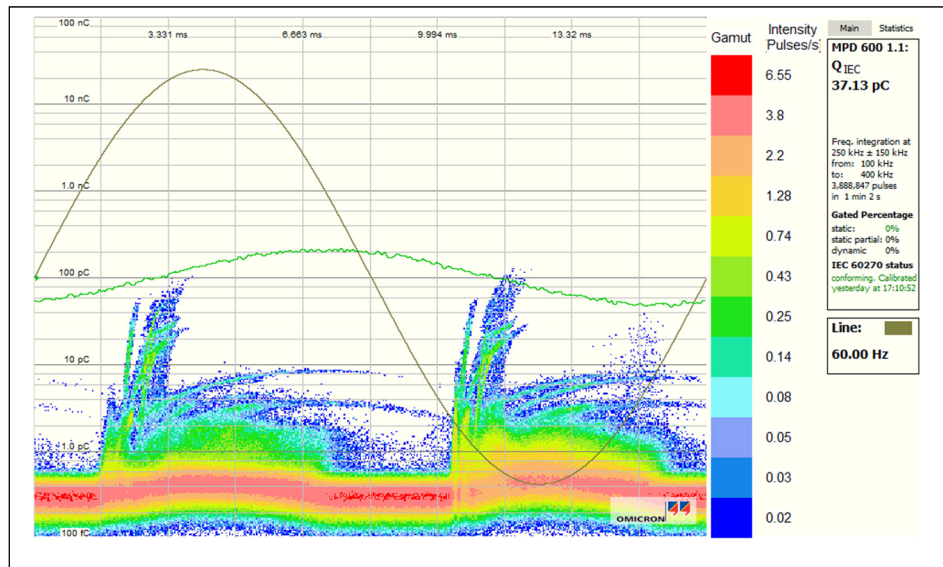


Figure 3.23 Histogramme des décharges partielles à 40 kV/mm
du condensateur PPR-3L

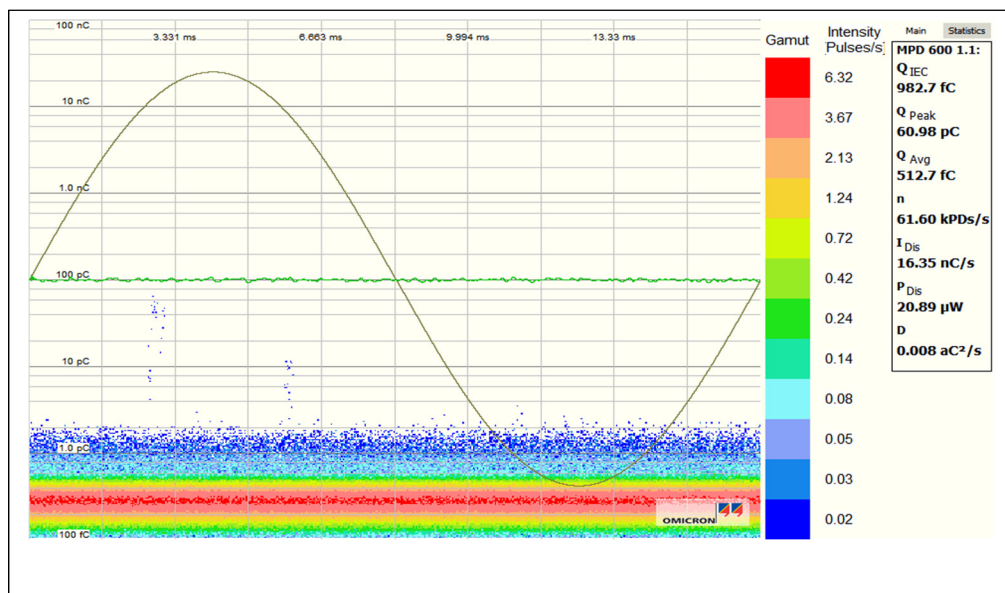


Figure 3.24 Histogramme des décharges partielles à 40 kV/mm
du condensateur PPRc-3L

Tableau 3.7 Charge apparente de DP à 40 kV/mm et à 60 Hz

Condensateur	Capacité (nF)	Q_{IEC} @ 40 kV/mm [pC]
PPR-3L	73,9	37,1
PPRc-3L	79	0,9

En comparant les histogrammes de DP sur les figures 3.23 et 3.24 des différentes configurations de condensateurs, on remarque que des signatures de DP de type « oreilles de lapin » ont été observés dans le cas du condensateur fabriqué avec 3 couches de polypropylène rugueux (PPR) n'ayant pas subi un traitement de surface corona. Cette signature de DP est due à une mauvaise adhésion entre la résine et le film de PPR. Cependant, le condensateur fabriqué avec 3 couches de PPR ayant subi un traitement de surface (PPRC) ne présente pas de DP sous une contrainte électrique appliqué de 40 kV / mm. En comparant la charge apparente de DP du tableau 3.8, on remarque que le niveau des DP est plus élevé dans le cas du condensateur fabriqué avec le film PPR que celui fabriqué avec le film PPRc. Les résultats ont montré une augmentation significative des performances du mur diélectrique grâce au traitement de surface (corona) effectués à la surface des films de PPR imprégnées de la résine époxy.

3.5 Identification des profils de décharge partielles par la méthode PRPD

Les profils de DP et les données statistiques (les amplitudes et le nombre de DP, etc.) contiennent des informations importantes sur la nature et la localisation du défaut. L'identification des types de défauts à partir des données statistiques de ces derniers représente l'étape de classification. La classification consiste à reconnaître le défaut à l'origine de la DP et la localisation consiste à localiser la position de la décharge dans une paroi diélectrique (Kreuger, Gulski, & Krivda, 1993; Sahoo et al., 2005). L'analyse des profils de DP peut être effectuée à l'aide du modèle de décharge partielle à résolution de phase (PRPD) obtenu à partir d'un système de mesure de PD (Álvarez, Garnacho, Khamlichi, & Ortego, 2016). Cette technique sera utilisée dans cette partie pour analyser les mesures de DP dans la continuité des

résultats préliminaires présentés dans (Gnonhoue et al., 2020). Elle consiste à créer artificiellement différentes formes de défauts dans les enroulements du condensateur haute tension sec afin d'établir un lien entre le type de défaut et les histogrammes PRPD.

Les enroulements de condensateurs tout film enroulé ont été conçus sur la base d'une paroi isolante constituée de trois couches de films diélectriques en polypropylène traités corona (PPRc) de 12,7 μm d'épaisseur (chaque couche) et d'une résine polymère thermodurcissable. L'encapsulation du condensateur dans la résine a été réalisée en utilisant la technique d'imprégnation sous vide et pression (VPI), qui est bien décrite dans le chapitre 2 et dans la littérature (Gnonhoue et al., 2020). Lors de la fabrication, les contraintes thermomécaniques appliquées sur une géométrie donnée jouent un rôle clé sur la création de défauts. Par exemple, une mauvaise imprégnation ou un mauvais dégazage de la résine thermodurcissable peut favoriser la création de bulles dans la résine. Ces bulles deviennent plus tard des sites potentiels d'activités de DP (lorsque leur taille dépasse la taille critique pour l'initiation de DP dans la paroi isolante). Un fort compactage du mur isolant peut également favoriser la présence de fissures dans le mur isolant. Ces fissures apparaissent souvent sous la forme allongée. Ainsi, pour corréler les profils PRPD avec les différents types de sources de DP possibles, deux types de défauts ont été créés : des cavités cylindriques ou arrondies et des fissures allongées qui ont été artificiellement introduites dans une couche de la paroi diélectrique de l'enroulement lors du processus de fabrication avant l'encapsulation (les défauts artificiels créés ne sont pas en contact avec les électrodes). Les DP ont été mesurées à l'aide d'un coupleur capacitif selon une procédure décrite dans la norme IEC 60270-2000 et d'un système de mesure PRPD (MPD600 d'Omicron®). Un condensateur contient deux cavités arrondies qui sont des cavités en forme de disque de 0,7 mm de diamètre et 12,7 μm de hauteur (Figure 3.25) et l'autre contient, en plus d'une cavité arrondie similaire, également une fissure allongée (Figure 3.26). La géométrie des condensateurs avec défauts est montrée dans la figure 2.1. Les micrographies des défauts ont été réalisées avec un microscope laser 3D Lext.

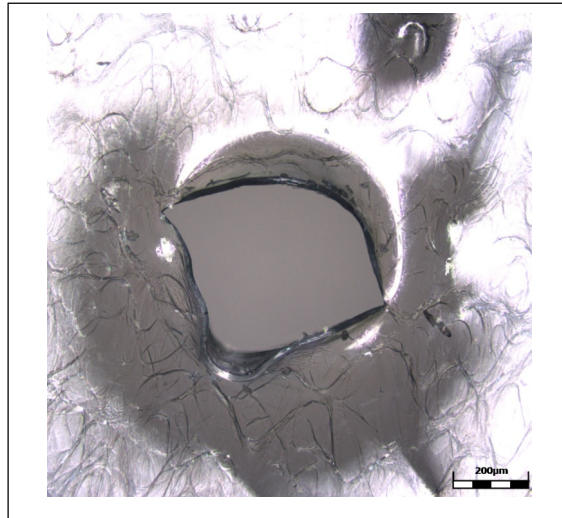


Figure 3.25 Micrographie d'un trou de 0,7 mm de diamètre et 12,7 μm de hauteur

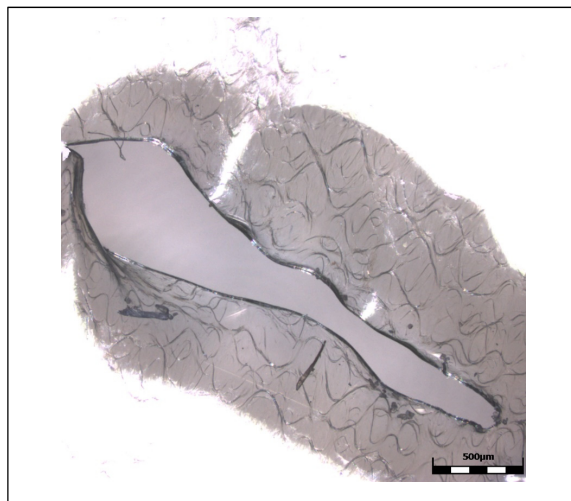
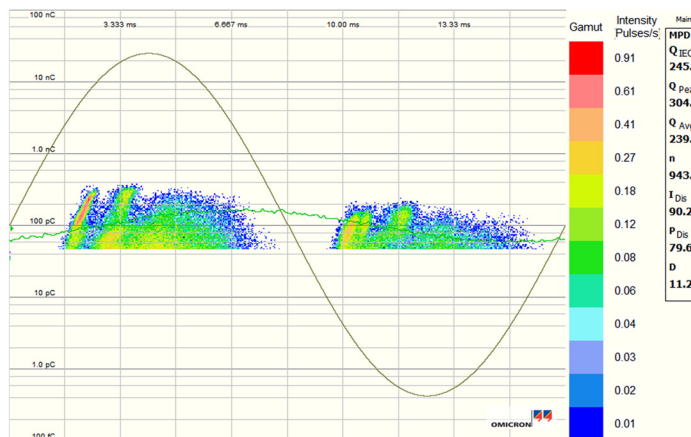


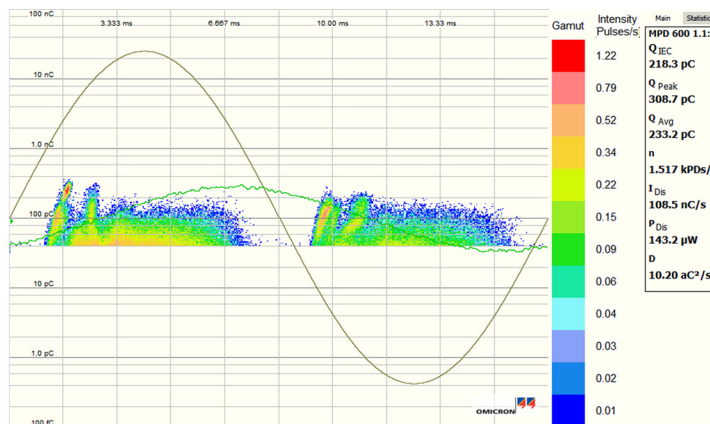
Figure 3.26 Micrographie d'un trou allongé (cavité allongée) de 12,7 μm de hauteur

Les Figures 3.27 et 3.28 montrent les histogrammes des condensateurs haute tension sec avec des défauts artificiels utilisés dans ce travail. Pour bien suivre l'évolution de la DP sous différents niveaux de contraintes électriques, pour chaque mesure, le niveau de bruit de fond (BGN) a été soustrait en sélectionnant le seuil correspondant donné par la mesure du bruit de fond. Les résultats de DP obtenus ont montré que les condensateurs avec des cavités arrondies

(Figure 3.28) comme défauts ne présentent pas de motifs PRPD en forme d'oreilles de lapin tandis que les condensateurs avec des fissures allongées (Figure 3.27) montrent ces signatures typiques.

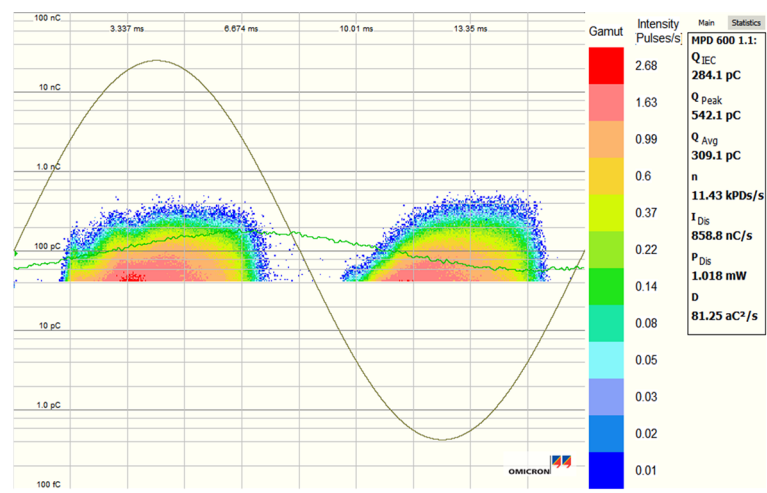


a) Échantillon avec un défaut allongé @ 40 kV/mm

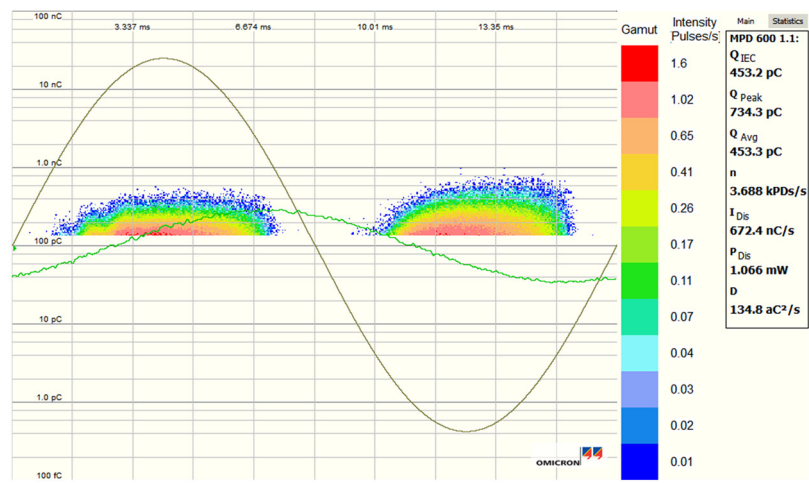


b) Échantillon avec un défaut allongé @ 60 kV/mm

Figure 3.27 Histogrammes des DP pour l'échantillon avec une fissure allongée



a) Échantillon avec les cavités arrondies @ 40 kV/mm



b) Échantillon avec les cavités arrondies @ 60 kV/mm

Figure 3.28 Histogrammes des DP pour l'échantillon avec des cavités arrondies

Selon (D. A. Nattrass, 1988), les critères ci-dessous peuvent être utilisés pour identifier le type et la nature de la MP :

- si les profils de DP sont symétriques dans les deux alternances (positives et négatives), alors ils sont générés par les DP internes.
- si les motifs DP sont asymétriques dans les deux alternances, alors ils sont générés soit par des DP de surface, soit par des DP de type corona, soit par des DP provenant d'un délamination entre une électrode et l'isolation.
- si les motifs de DP sont asymétriques avec prédominance des décharges dans l'alternance négative, alors les DP proviennent généralement de décharges de type corona.

Si les DP sont internes et s'ils apparaissent avant le pic de tension dans les deux alternances :

- si le rapport des amplitudes maximales de PD dans les deux alternances positive (H^+) et négative (H^-) est égal, c'est-à-dire $H^+ / H^- = 1$ suite à l'augmentation de tension, alors la décharge se produit dans une cavité située dans le diélectrique.
- si l'amplitude de DP augmente lentement avec l'augmentation de la tension, alors la décharge est due à la présence de plusieurs cavités de différentes tailles dans le diélectrique.
- s'il y a une différence significative entre H^+ et H^- , H^- est supérieur à H^+ et s'il y a un petit nombre de grande amplitude de DP dans l'alternance négative et un grand nombre de petites DP dans l'alternance positive, alors, si les DP apparaissent avant le pic de tension; les décharges apparaissent alors dans une cavité située entre l'électrode reliée à la masse et le diélectrique.
- s'il y a un grand nombre de faibles amplitudes de DP dans l'alternance négative et un petit nombre de grandes décharges dans l'alternance positive, et si les décharges apparaissent avant le pic de tension; la décharge se produit alors dans une cavité située entre l'électrode connectée à la haute tension et au diélectrique.
- si la décharge se produit en surface et si les motifs sont asymétriques (les motifs dans l'alternance positive sont différents de l'alternance négative), alors, s'il y a plus de DP dans

les alternances négatives que positives et si $H^+ > H^-$; les décharges se produisent à la surface de l'isolant (elles peuvent être causées par de la poussière ou d'autres contaminants).

- Si les DP n'apparaissent que dans l'alternance négative, il s'agit généralement de DP de type corona qui se produisent en raison des rehaussements localisés du champ électrique. Cependant si le rapport H^+/H^- est proche de 1 et H^+ supérieur à H^- en raison de l'augmentation de la tension, alors il existe plusieurs sources de DP (internes et corona).

Afin de mieux comprendre les résultats obtenus pour les échantillons présentant des défauts artificiels, ils seront comparés à ceux obtenus pour un échantillon sans défauts. Par exemple, dans le tableau 3.8, les différents niveaux de DP et les capacités pour chaque type d'échantillon sont présentés.

Tableau 3.8 Résultats des DP et la valeur de la capacité

Échantillons	Condensateur sans défauts	Condensateur avec deux cavités cylindriques	Condensateur avec une cavité cylindrique et une fissure allongée
Capacité (nF)	79.5	66.5	66.1
Q_{IEC} (pC) @ 40 kV/mm	29,9	284,1	245,4
Q_{IEC} (pC) @ 60 kV/mm	29,8	453,2	218,3

Les tableaux 3.9 et 3.10 présentent les données statistiques de DP pour les enroulements de condensateurs sans et avec défauts, à 40 et 60 kV/mm, respectivement. Pour obtenir des valeurs spécifiques pour chaque alternance du signal électrique, les données ont été récupérées à l'aide de l'onglet Gate du logiciel Omicron appliqué avec un seuil correspondant au niveau du bruit de fond.

En regroupant les données statistiques de DP (tableaux 3.10 et 3.11) et les motifs de DP montrés sur les Figures 3.27 et 3.28, nous pouvons observer que la DP de surface et couronne ne se produisent pas dans les enroulements de condensateur utilisés dans ce travail. Ainsi, les DP mesurées dans notre cas sont uniquement des DP internes, qui se produisent dans le mur isolant.

Afin de pouvoir identifier la nature du défaut à l'origine de ces DP internes et de comparer les niveaux de DP des condensateurs avec défauts avec ceux sans défauts, on peut remarquer que:

- dans l'alternance négative, pour l'enroulement du condensateur avec deux cavités arrondies et dans les deux alternances, dans le condensateur ayant comme défaut une fissure allongée, l'amplitude de PD augmente avec l'augmentation de la tension. On est alors en présence de cavités internes de tailles différentes.
- Dans le condensateur ayant comme défaut une fissure allongée, on observe que le nombre de DP (N) augmente avec l'augmentation de la tension, ce qui correspond à des décharges internes.

On peut donc conclure que ce sont les défauts créés artificiellement qui produisent les DP observées sur ces condensateurs en comparant les résultats à ceux obtenus dans (Gnonhoue et al., 2020).

Tableau 3.9 Données statistique des DP à 40 kV/mm

Classification des données		Condensateur avec deux cavités cylindriques	Condensateur avec une cavité cylindrique et une fissure allongée
Amplitude maximale des DP	H ⁺	445,0 pC	304,7 pC
	H ⁻	542,1 pC	224,8 pC
Nombre de DP	N ⁺	6,3 kPDs/s	588,8 PDs/s
	N ⁻	5,4 kPDs/s	422,8 PDs/s

Tableau 3.10 Données statistique des DP à 60 kV/mm

Classification des données		Condensateur avec deux cavités cylindriques	Condensateur avec une cavité cylindrique et une fissure allongée
Amplitude maximale des DP	H ⁺	493,0 pC	308, 7 pC
	H ⁻	884,8 pC	244,5 pC
Nombre de DP	N ⁺	1,6 kPDs/s	919,8 kPDs/s
	N ⁻	2,3 kPDs/s	544,4 kPDs/s

Les mesures de PD ont montré que les enroulements de condensateur avec des cavités arrondies en tant que défauts ne présentent pas de motifs PRPD en forme d'oreilles de lapin, contrairement aux enroulements avec des fissures allongées. L'analyse des données statistiques de DP a montré que les DP proviennent de cavités de différentes tailles situées entre les électrodes du condensateur. Le comportement de la DP s'est avéré dépendre de la forme du défaut dans le mur isolant. De plus, ces résultats préliminaires permettent de classer certains échantillons fabriqués avec une seule bobine enroulée avec cette technologie liée au type de défaut naturellement présent (lorsqu'aucun défaut artificiel n'est introduit). Des travaux complémentaires doivent être menés afin de mieux comprendre les mécanismes de création et de localisation des défauts internes entre les couches de PPRc, entre les électrodes et la résine thermodurcissable.

CHAPITRE 4

DÉTERMINATION DES FACTEURS INFLUENÇANT L'APPARITION DES DÉCHARGES PARTIELLES

Dans cette partie, l'influence du niveau de tension aux bornes du condensateur VPI, la taille de la cavité à l'intérieur du mur isolant et de la permittivité de la résine sur l'activité des décharges partielles (DP) seront évaluées par la modélisation numérique. La tension de claquage dans la cavité a été évaluée en utilisant l'équation de Paschen pour les microcavités supérieures à 3,5µm (équations 4.1 et 4.2) (Babrauskas, 2013). La modélisation numérique a été réalisée dans le logiciel Matlab. Elle a permis de déterminer le nombre de DP par cycle. Le champ électrique permettant d'initier une décharge dans l'air à pression et température normales est donnée par :

$$E_c = \frac{59+2,07\sqrt{d_c}}{0,886\sqrt{d_c}-1} \quad \text{Valide pour } d_c > 3,5 \mu\text{m} \quad (4.1)$$

$$U_s = E_c * d_c \quad (4.2)$$

U_s : tension de claquage dans la cavité (V)

d_c : l'épaisseur de la cavité (µm)

E_c : champ de claquage dans la cavité (V/ µm)

4.1 Influence du niveau de tension sur l'activité des DP

4.1.1 Cavité rectangulaire

L'activité des DP dans la cavité rectangulaire sera étudiée en utilisant le modèle purement capacitif ABC (équation 4.3) (Aakre, 2020). Dans cette partie, l'influence de la tension électrique sur l'apparition du phénomène des DP sera étudiée. Pour cette étude, la tension choisie aux bornes du condensateur est de 4 kV.

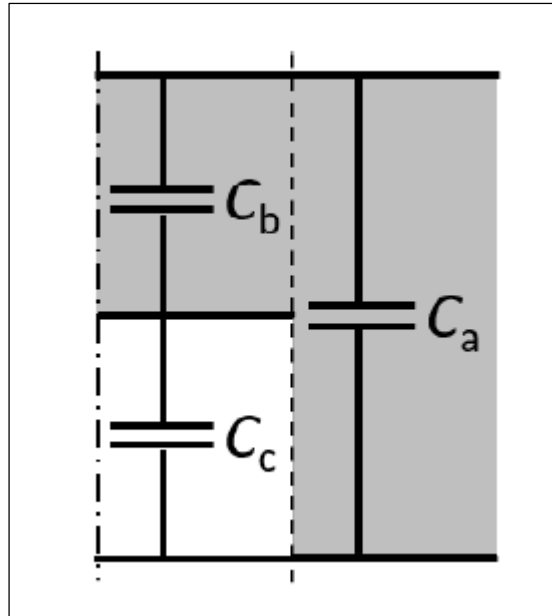


Figure 4.1 Modèle purement capacitif ABC
Tirée de Aakre (2020)

$$V_c = \frac{1}{1 + \frac{d_b}{d_c} * \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_b}} V_a \quad (4.3)$$

V_c : la tension aux bornes de la cavité;

V_a : la tension aux bornes du condensateur;

d_c : l'épaisseur de la cavité;

d_b : l'épaisseur de la partie du condensateur en contact avec la cavité;

ε_b : la permittivité relative de la résine;

ε_c : la permittivité relative de la cavité.

Le nombre de DP en fonction de la tension aux bornes du condensateur pendant une période de tension est donné par l'équation 4.4 (Aakre, 2020).

$$n = 2 \times \left[2 \times \frac{\max V_x - U_r}{U_s - U_r} \right] = 2 \times f(x) \quad (4.4)$$

où $\max V_x$ est la tension maximale appliquée aux bornes de la cavité en l'absence d'activité de DP, U_r est la tension résiduelle des DP et U_s est la tension de claquage du gaz à l'intérieur de la cavité. $f(x)$ est la fonction plancher mathématique.

Cas référentiel

Dans ce cas référentiel, l'activité des DP est enregistrée pour une tension maximale de 2,12 kV (correspondant à 1,5 kV rms) aux bornes du condensateur. La taille du défaut est de 12,7 μm (soit l'épaisseur d'un ruban de PP), la fréquence est de 60 Hz, l'épaisseur du mur isolant de la bobine après imprégnation est supposée à 39,7 μm . La permittivité du mur diélectrique est essentiellement celle du PP soit 2,2. Le gaz à l'intérieur du défaut est supposé être de l'air et sa pression est la pression atmosphérique. La tension résiduelle dans la cavité après l'activité des DP est supposée à 100 V.

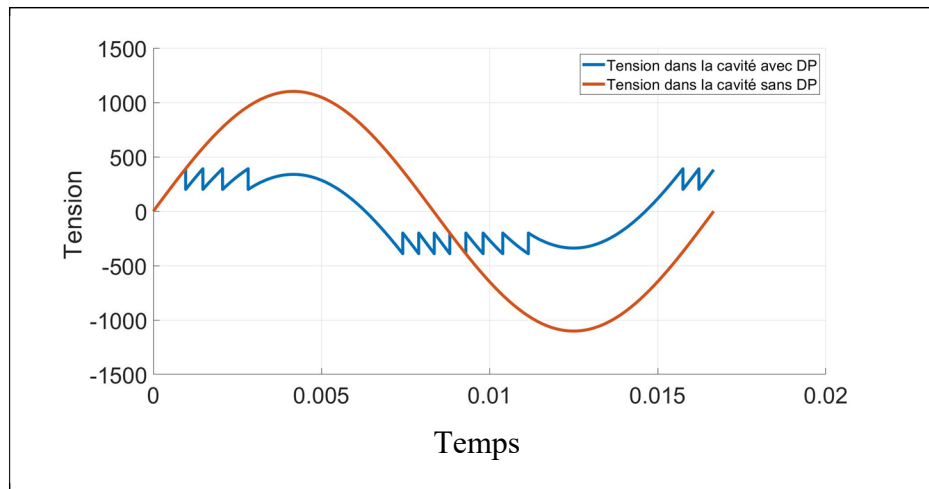


Figure 4.2 Activité des décharges partielles pour une tension crête de 2,12 kV

On peut très bien voir dans la figure 4.2, l'activité des DP. La figure 4.2 montre bien que lorsque la tension aux bornes du condensateur atteint la tension de claquage du gaz à l'intérieur de la cavité, les décharges partielles apparaissent. On peut aussi voir que pour une tension crête de 2,12 kV aux bornes du condensateur, il y a 14 activités de DP sur une période. Si on considère que nous avons 60 périodes/s, et que nous avons trouvé théoriquement 14 DP/période pour une tension maximale de 2,12 kV aux bornes du condensateurs, on aura alors 840 DP/s par cavité et par conséquent pour les deux défauts, on aura 1680 DP/s (1,680 kPDs/s). En utilisant les résultats expérimentaux des condensateurs contenant un défaut allongé, nous trouvons 943,1 PDs/s. Les résultats théoriques sont sensiblement égaux aux résultats expérimentaux mais la différence entre les valeurs théoriques et expérimentaux s'explique par le fait que dans la simulation théorique nous avons utilisé uniquement la permittivité du polypropylène pour faire la simulation alors que dans la réalité le mur isolant est constitué de polypropylène et de la résine époxy. De plus la valeur de la tension résiduelle a été posée arbitrairement. Finalement, un défaut peut correspondre à un site pour plus d'une décharge tout dépendamment de la dimension des canaux de décharges et de la dynamique de relaxation des charges de surface. Une étude plus détaillée de ces phénomènes est très complexe et sort du cadre de ce travail. Des études complémentaires doivent être menées afin d'expliquer

l'interaction entre les différents composants du condensateur VPI et la présence des DP. La tension dans la cavité sans l'activité des DP (en couleur orange) et celle avec l'activité des DP (en couleur bleue).

- Pour une tension électrique $U_{max} = 4 \text{ kV}$, on obtient la courbe suivante.

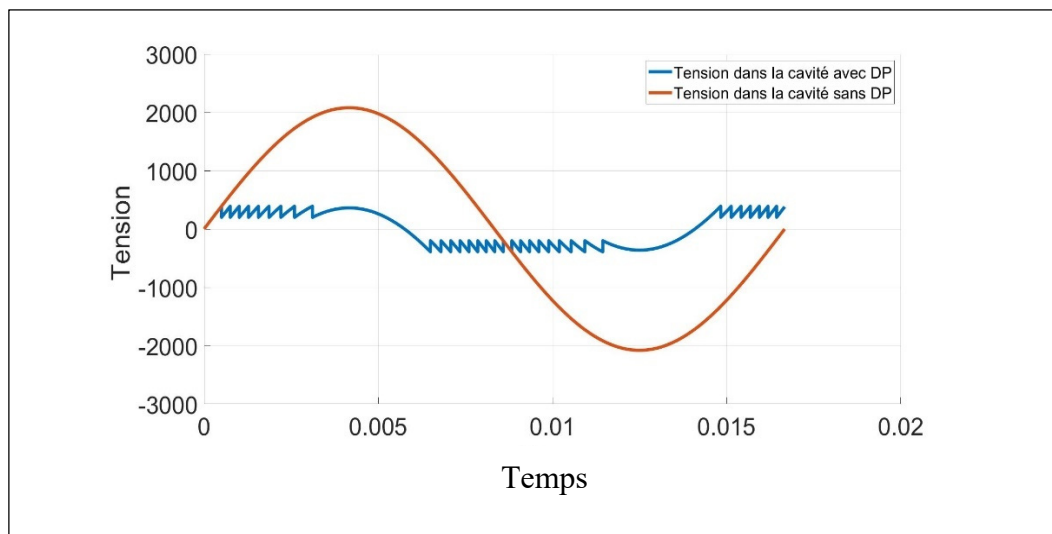


Figure 4.3 Activité des décharges partielles pour une tension de 4 kV

Dans ce cas, 34 activités de DP sont enregistrées. Nous pouvons remarquer que le nombre de DP augmente davantage pour une tension de 4 kV. On peut conclure que le nombre de décharges partielles augmente en fonction de la tension d'alimentation et plus la tension aux bornes du condensateur est croissante, plus le nombre de décharges partielles augmente. Les vérifications réalisées en utilisant l'équation 4.4 ont permis de confirmer le nombre de décharge partielle par cycle.

L'activité des DP dans les cavités, dépend de plusieurs paramètres dont la tension appliquée aux bornes du condensateur. Le nombre de décharges partielles devient plus important pour des valeurs de tensions croissantes aux bornes du condensateur. Cette augmentation s'explique par le fait que lorsque la tension aux bornes du condensateur devient élevée, une tension élevée

est aussi appliquée sur la cavité. Ainsi, lorsque la tension appliquée est augmentée, le champ électrique à l'intérieur de la cavité est aussi augmenté et le taux de génération d'électrons libre à l'intérieur de la cavité est aussi augmentée, ce qui correspond à un plus grand nombre d'électrons dans la cavité. Par conséquent, il y a plus de DP par cycle à mesure que l'amplitude de la tension appliquée augmente. Les mêmes résultats ont été trouvés par (Forssen & Edin, 2004; Hazlee Azil Illias, 2011).

4.2 Influence de la taille de la cavité sur l'activité des DP

4.2.1 Cavité rectangulaire

Le nombre de DP en fonction de la taille de la cavité a été évalué pour une tension électrique $U_{\text{max}} = 4 \text{ kV}$ aux bornes du condensateur.

- Pour $d_c = 16 \text{ } \mu\text{m}$, le nombre de DP est égale à 39 par période

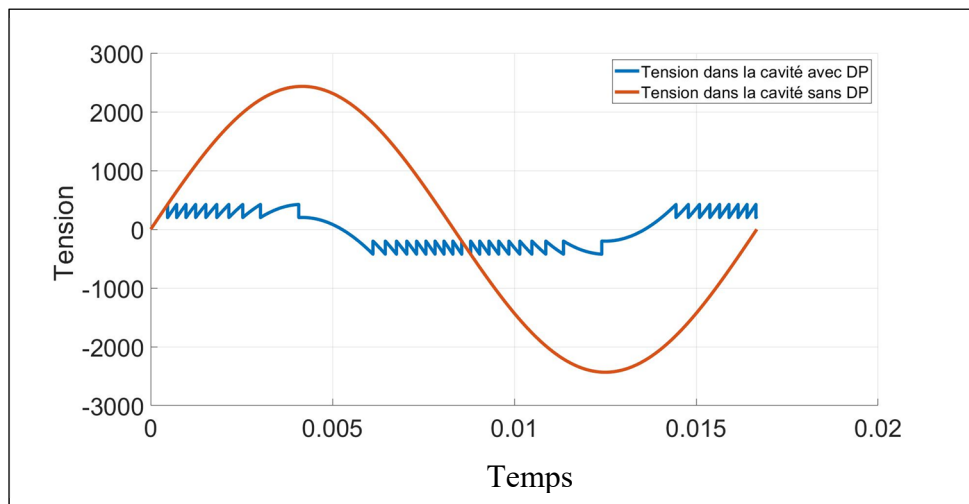


Figure 4.4 Nombre de décharges partielles pour $d_c = 16 \text{ } \mu\text{m}$

- Pour $d_c = 19 \mu\text{m}$, le nombre de DP est égale à 35 par période

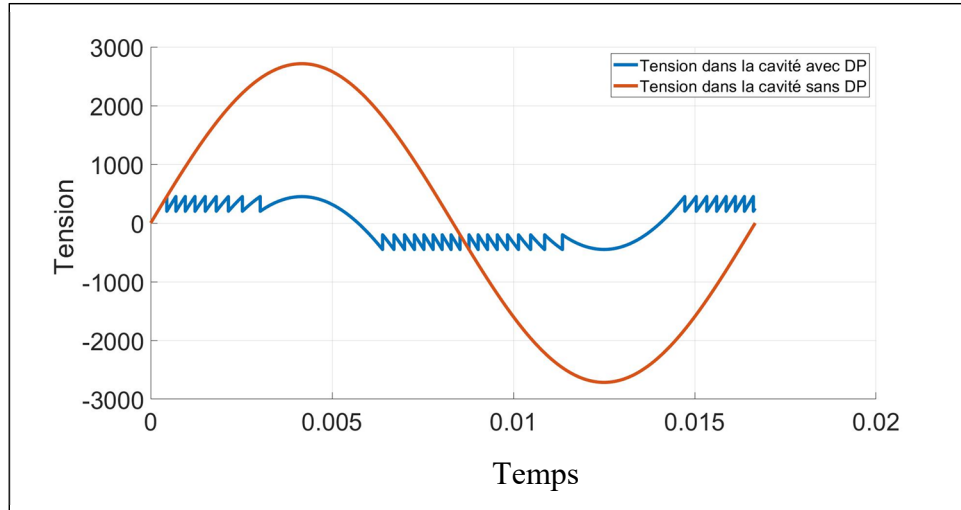


Figure 4.5 Nombre de décharges partielles pour $d_c = 19 \mu\text{m}$

- Pour $d_c = 22 \mu\text{m}$, le nombre de DP est égale à 35 par période

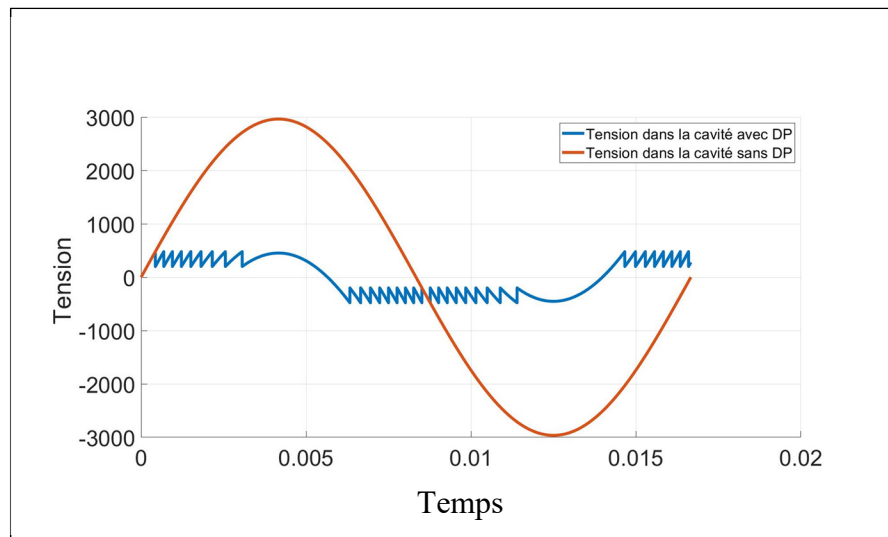


Figure 4.6 Nombre de décharges partielles pour $d_c = 22 \mu\text{m}$

- Pour $d_c = 25 \mu\text{m}$, le nombre de DP est égale à 35 par période

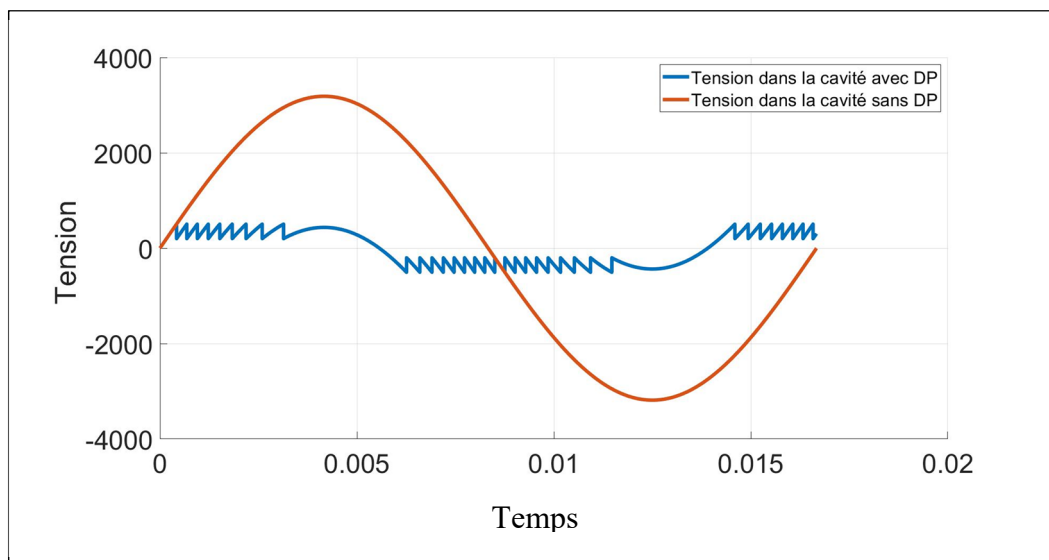


Figure 4.7 Nombre de décharges partielles pour $d_c = 25 \mu\text{m}$

- Pour $d_c = 28 \mu\text{m}$, le nombre de DP est égale à 35 par période

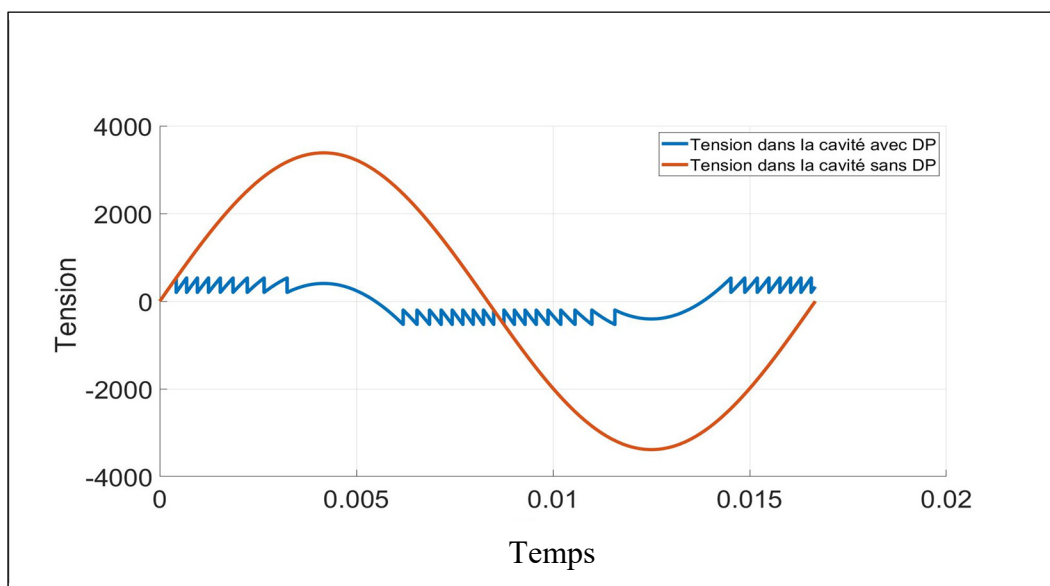


Figure 4.8 Nombre de décharges partielles pour $d_c = 28 \mu\text{m}$

- Pour $d_c = 31 \mu\text{m}$, le nombre de DP est égale à 35 par période

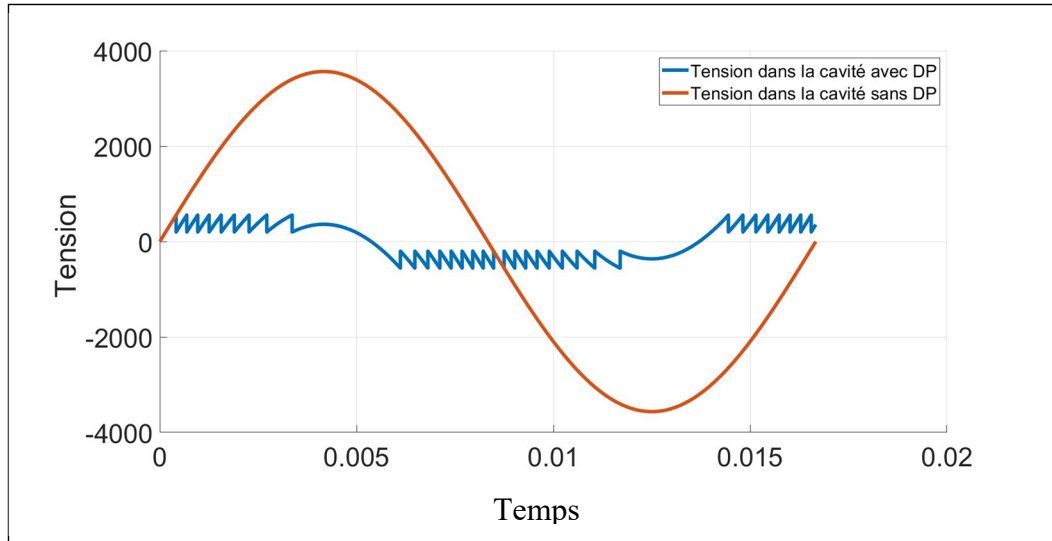


Figure 4.9 Nombre de décharges partielles pour $d_c = 31 \mu\text{m}$

- Pour $d_c = 34 \mu\text{m}$, le nombre de DP est égale à 35 par période

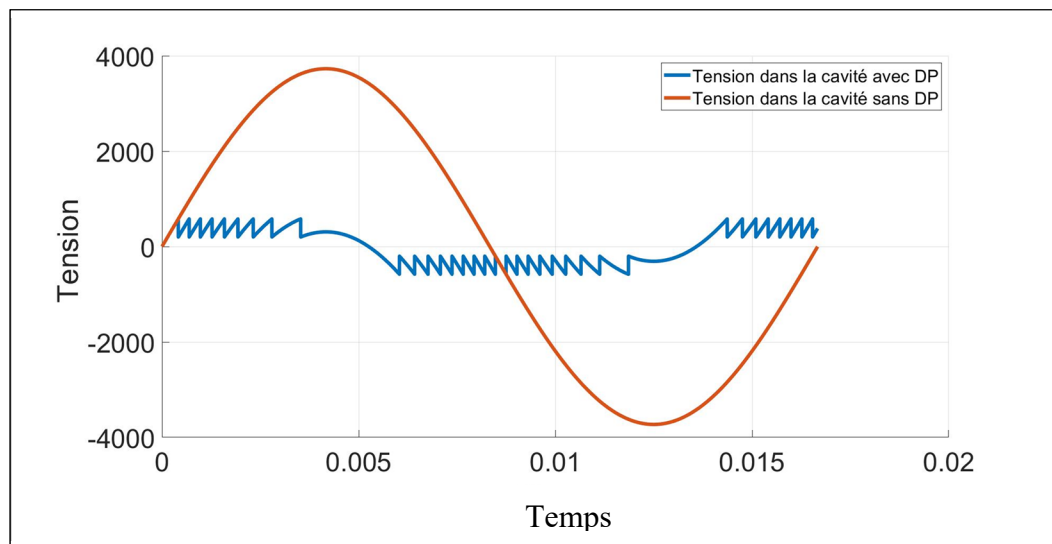


Figure 4.10 Nombre de décharges partielles pour $d_c = 34 \mu\text{m}$

- Pour $d_c = 37 \mu\text{m}$, le nombre de DP est égale à 35 par période

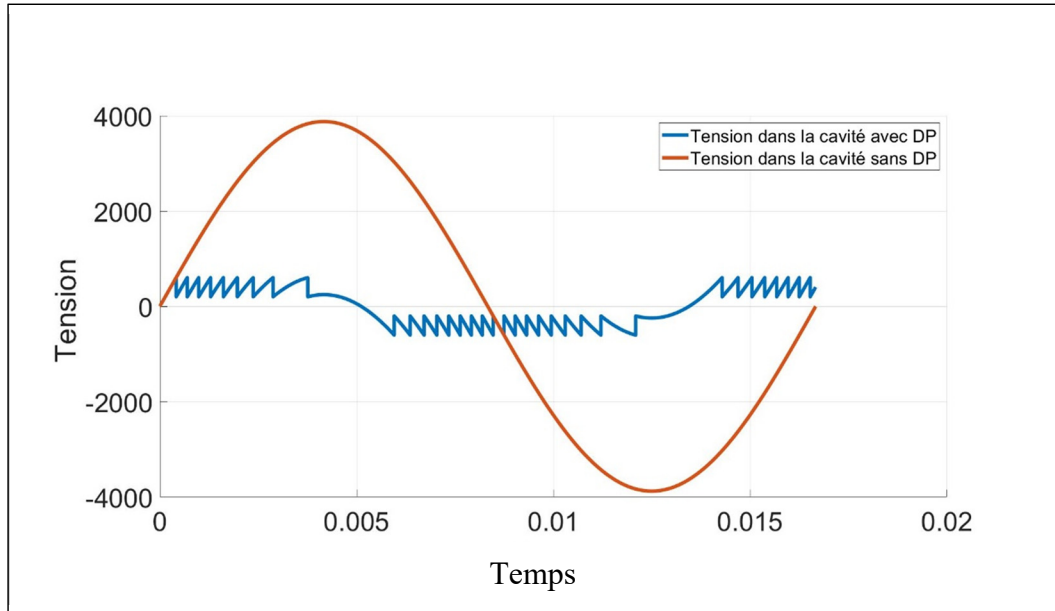


Figure 4.11 Nombre de décharges partielles pour $d_c = 37 \mu\text{m}$

On remarque que le nombre de DP varie en fonction de la taille de la cavité. Ce dernier varie de 35 à 39 DP par période dans le cas étudié. Ce nombre diminue quand la taille de la cavité augmente. Les mêmes résultats ont été trouvés par (Hazlee Azil Illias, 2011) qui stipule que le nombre de DP par cycle est plus faible pour les plus grandes cavités.

4.3 Influence de la permittivité sur l'activité des DP

4.3.1 Cavité rectangulaire

Dans cette partie, le nombre de DP par période en fonction de la permittivité du polypropylène a été déterminé pour une tension $U_{\text{max}} = 4 \text{ kV}$ aux bornes du condensateur et pour une taille de cavité $d_c = 12.7 \mu\text{m}$.

- Pour $\varepsilon_b = 2,2$, le nombre de DP est égale à 34 par période

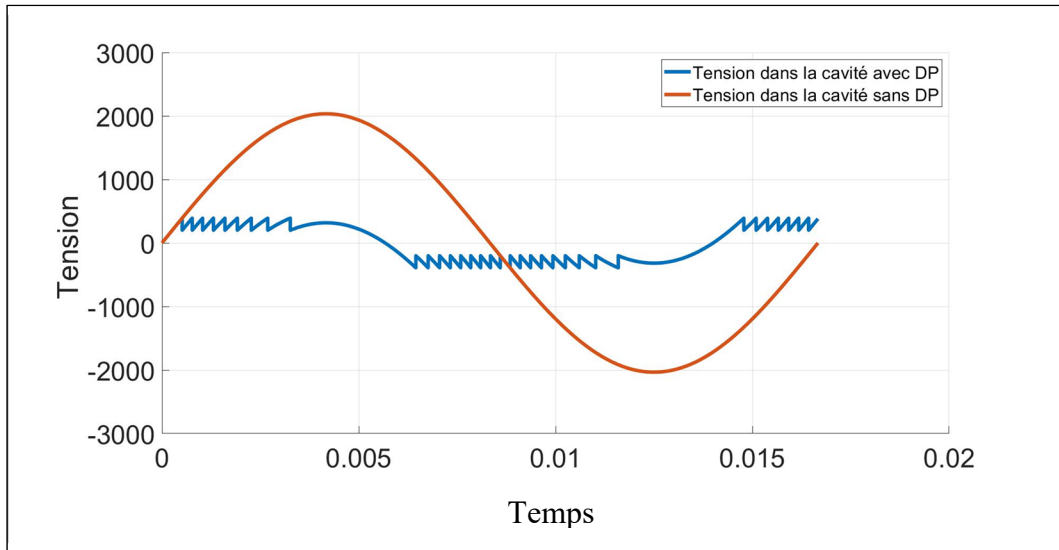


Figure 4.12 Nombre de décharges partielles pour $\varepsilon_b = 2,2$

- Pour $\varepsilon_b = 3$, le nombre de DP est égale à 42 par période

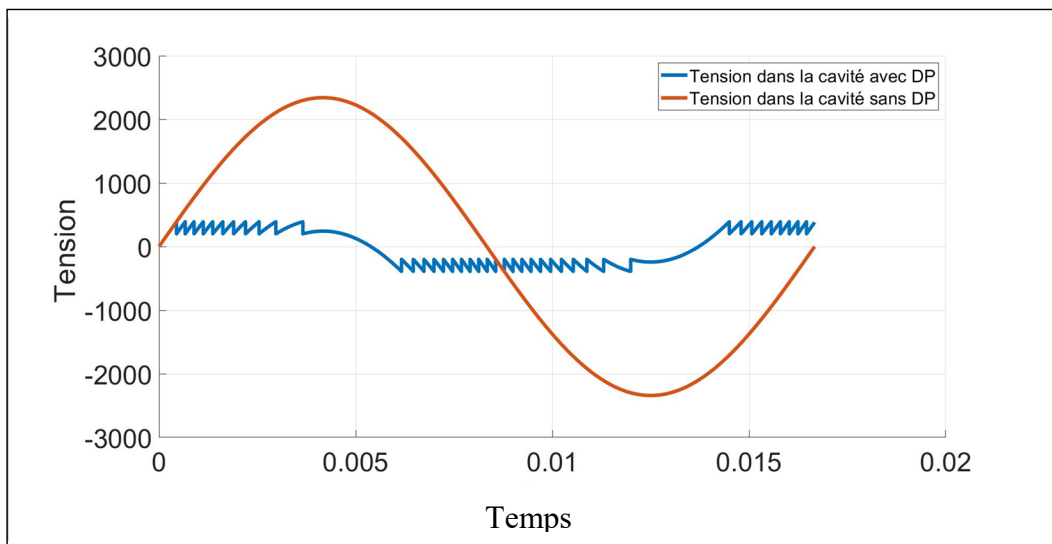


Figure 4.13 Nombre de décharges partielles pour $\varepsilon_b = 3$

- Pour $\epsilon_b = 4$, le nombre de DP est égale à 46 par période

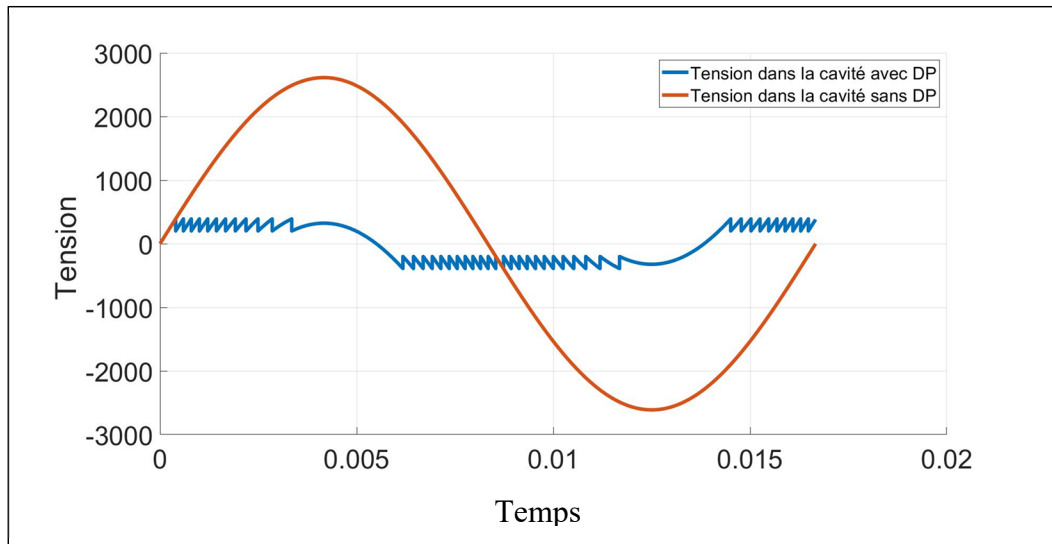


Figure 4.14 Nombre de décharges partielles pour $\epsilon_b = 4$

On remarque que le nombre de DP augmente quand la permittivité du mur isolant augmente et ce nombre varie de 34 à 46 DP par période pour un niveau de tension maximale de niveau de 4 kV aux bornes du condensateur. (Budde & Kurrat, 2008) a montré dans ces travaux qu'avec l'augmentation de la permittivité relative, le champ électrique dans la cavité devient plus élevé provoquant ainsi les conditions pour le démarrage de l'activité des DP. (El-Refaie, Elrahman, & Zidane, 2017) ont montré que les valeurs de DP dans un matériau isolant à permittivité relative élevée est supérieur à celui des matériaux à faible permittivité relative ayant la même dimension de cavité. Les résultats de ces travaux ont montré que la charge apparente maximales des DP augmente avec l'augmentation de la permittivité relative du matériau isolant, ce qui a pour résultat d'augmenter le champ électrique à l'intérieur dans la cavité. L'activité des DP n'est pas seulement influencée par la taille de la cavité mais également par la permittivité du mur isolant qui entoure la cavité. Elle est aussi influencée par la tension appliquée aux bornes du condensateur.

CHAPITRE 5

SEUIL D'APPARITION DES DÉCHARGES PARTIELLES (DP)

Le seuil d'apparition (tension d'allumage ou tension d'initiation) des DP dans la couche isolante des condensateurs haute tension sec, est la tension seuil à partir de laquelle les décharges sont initiées dans le condensateur haute tension sec, lorsque la tension est augmentée graduellement, à partir d'un niveau pour lequel aucune décharge n'est susceptible de se produire dans le condensateur.

Le seuil d'extinction des DP est la tension seuil à partir de laquelle les décharges s'éteignent dans le condensateur haute tension sec lorsque la tension est diminuée graduellement à partir d'un niveau pour lequel des décharges étaient dans le condensateur. Ce travail présentera uniquement les résultats du seuil d'apparition des DP dans les condensateurs haute tension sec VPI (ceux ayant une seule bobine).

5.1 Détermination théorique du seuil d'apparition des Décharges partielles (DP)

Dans la partie théorique, la tension d'initiation des DP a été déterminée dans les défauts rectangulaire afin d'évaluer la corrélation entre la géométrie du défaut à l'intérieur du mur isolant des condensateurs VPI et la tension d'initiation des DP. Ainsi l'étude théorique a été réalisée dans les cavités rectangulaire. L'activité des DP dans la cavité rectangulaire sera étudiée en utilisant le modèle purement capacitif ABC (équation 5.3) (Aakre, 2020). La tension de claquage dans la cavité a été évaluée en utilisant l'équation de Paschen pour les microcavités supérieures à 3,5µm (équation 5.1 et 5.2) (Babrauskas, 2013).

$$E_c = \frac{59+2,07\sqrt{d_c}}{0,886\sqrt{d_c}-1} \quad \text{Valide pour } d_c > 3,5 \mu\text{m} \quad (5.1)$$

$$U_c = E_c * d_c \quad (5.2)$$

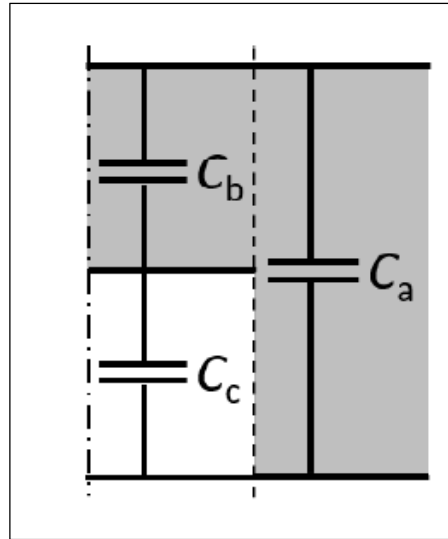


Figure 5.1 Modèle purement capacitif ABC
Tirée de Aakre (2020)

$$V_c = \frac{1}{1 + \frac{d_b}{d_c} * \frac{\epsilon_c}{\epsilon_b}} V_a \quad (5.3)$$

V_c : la tension aux bornes de la cavité;

V_a : la tension aux bornes du condensateur;

d_c : l'épaisseur de la cavité;

d_b : l'épaisseur de la partie du condensateur en contact avec la cavité;

ϵ_b : la permittivité relative de la résine;

ϵ_c : la permittivité relative de la cavité;

Le seuil d'apparition des DP a été déterminé en égalisant l'équation de Paschen avec la tension aux bornes de la cavité dans le modèle capacitif (voir équation 5.4). La solution de l'équation

est $V_a = 768,3 \text{ V}$ avec les paramètres numériques ci-dessous pour une cavité rectangulaire de $12,7 \text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur.

$$\frac{59+2,07\sqrt{d_c}}{0,886\sqrt{d_c}-1} * d_c = \frac{1}{1+\frac{d_b*\epsilon_c}{d_c*\epsilon_b}} V_a \quad (5.4)$$

$$d_a = 39.7 \text{ }\mu\text{m}$$

$$d_b = d_a - d_c \text{ (}\mu\text{m)}$$

$$\epsilon_c = 1$$

$$\epsilon_b = 2.2$$

$$V_a \text{ (Volts)}$$

La figure 5.2 présente le seuil d'apparition des DP en fonction de la taille (d_c) d'une cavité rectangulaire.

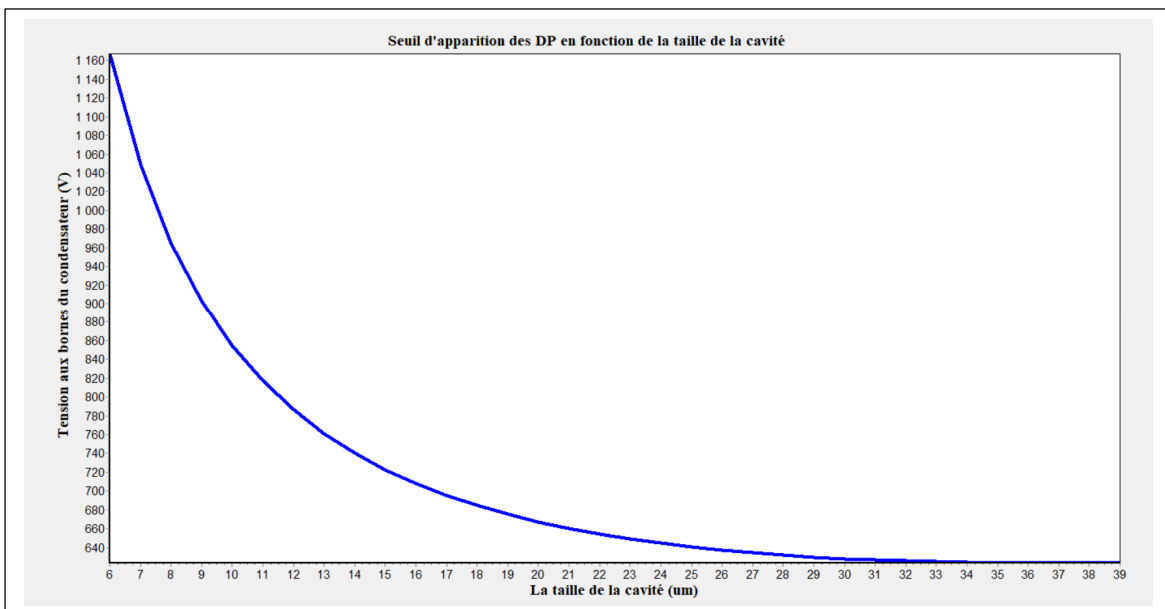


Figure 5.2 Seuil d'apparition des DP en fonction de la taille de la cavité

On peut remarquer dans les figures 5.2 que le seuil d'allumage des DP dans une cavité diminue quand le diamètre augmente (elle est plus élevée pour les petites cavités que pour les grandes cavités). Ce résultat est conforme à celui obtenu par (Budde & Kurrat, 2008; Hazlee Azil Illias, 2011; H. A. Illias, Chen, & Lewin, 2009; H. A. Illias, Chen, & Lewin, 2011). (Hazlee Azil Illias, 2011) explique dans ces travaux que cette tension est plus élevée dans les cavités de petits diamètres car dans ces derniers, le taux de génération d'électron libres est faible. Ce faible taux nécessite des tensions d'allumage élevée afin d'initier l'activité des DP dans les cavités.

5.2 Détermination expérimentale du seuil d'apparition des DP

La figure 5.3 présente le banc d'essai pour la mesure de la tension d'initiation des DP.

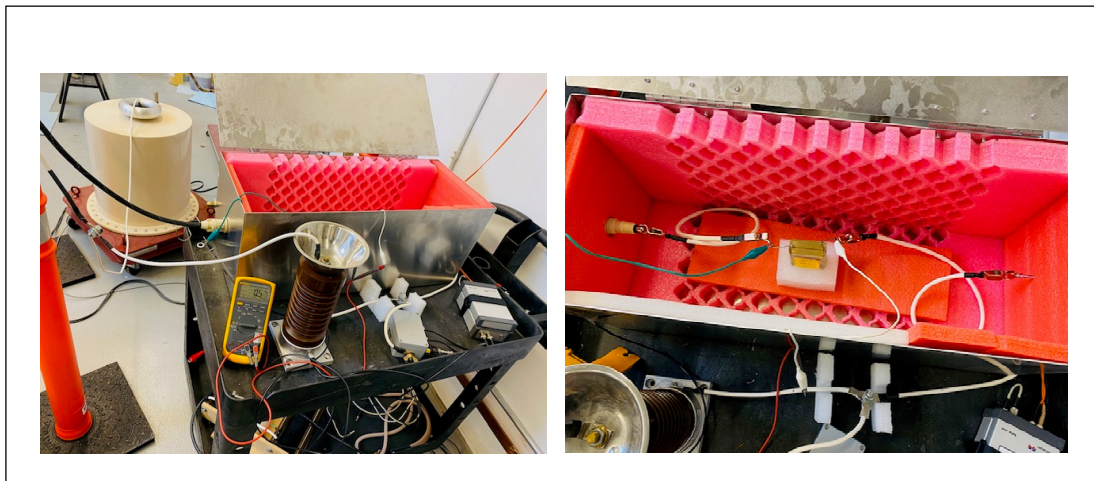


Figure 5.3 banc d'essai pour la mesure de la tension d'initiation des DP

La figure 5.4 montre les images des condensateurs utilisés dans la détermination expérimentale de la tension d'initiation des DP.



Figure 5.4 Condensateurs VPI utilisés pour la mesure de la tension d'initiation des DP

Tableau 5.1 Tension d'initiation des DP pour des échantillons présentant des défauts

Échantillons VPI	Capacité (nF)	Tension d'initiation (*U _{in}) des DP (V)	Moyenne des tensions d'initiation des DP (V)
56 (Fabriqué avec la résine époxy VonRoll)	95,55	540	557,5
84 (fabriqué avec la résine époxy Hunstamn)	68,8	540; 490	
85 (Fabriqué avec la résine époxy Hunstamn)	68,8	490	
87 (Fabriqué avec la résine époxy Hunstamn)	67,5	630; 600	
88 (Fabriqué avec la résine époxy Hunstamn)	68,7	590; 580	

* U_{in} représente les valeurs rms mesurées aux bornes des échantillons présentant des défauts

À travers les résultats expérimentaux présentés dans le tableau 5.1, la tension d'initiation des condensateurs haute tension sec ayant une seule bobine est de 557,5 V (rms) ce qui correspond à une tension de 788 V (pic). Sur la figure 5.2, on peut remarquer que cette tension correspond à une taille de cavité de 12,7 μm ce qui correspond assez bien à des micro-cavités de quelques microns. La valeur de la tension d'allumage pour ces condensateurs avec défauts indique la présence de microcavités entre 5 et 12,7 μm .

CONCLUSION

Les performances de deux technologies de condensateur sec haute tension ont été évaluées. La technologie des condensateurs imprégnés de résine et ceux des condensateurs dans l'air. Les résultats ont montré que l'utilisation de la résine, nous avons une augmentation de la rigidité diélectrique qui se situe entre 9% et 11% (l'utilisation de la résine n'augmente pas de façon significative la rigidité diélectrique du mur isolant). Les résultats ont permis de conclure que l'utilisation de la résine ne permet pas d'améliorer la rigidité diélectrique mais permet diminuer la présence des décharges partielles (DP) dans les condensateurs. Néanmoins, en comparant les histogrammes des DP et les données statiques des DP, on note que l'usage de la résine thermodurcissable a permis une diminution significative du niveau de DP.

L'étude des paramètres influençant l'activité des DP a permis de montrer qu'elle n'est pas seulement influencée par la taille de la cavité mais également par la forme de la cavité. Elle est aussi influencée par la tension appliquée aux bornes du condensateur et par la permittivité de la résine. Les résultats expérimentaux ont montré une augmentation significative des performances du mur diélectrique grâce au traitement de surface (corona) effectués à la surface des films de PPR imprégnées de la résine époxy.

En comparant les résultats théoriques et expérimentaux, on peut remarquer que la tension d'allumage théoriques des DP est de 768,3 V tandis que celle expérimentales présentés dans la dernière partie du travail est de 788 V.

Les travaux complémentaires doivent être menés sur l'identification des profils de DP dans les condensateurs haute tension sec afin de mieux expliquer l'interaction entre la géométrie du défaut, les différents composants du mur isolant et la présence des DP

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aakre, T. G. (2020). *Partial Discharges in Voids at Variable Voltage Frequency and Temperature. Diagnostic Testing of Stator Mainwall Insulation* (Norwegian University of Science and Technology, Norwegian).
- Alobaidi, Q. M. (2016). study of polyetherimide (PEI)-polyethylene terephthalate blends (PET). *02 DAYS, 5th international conference on recent trends in engineering, science & management*.
- Álvarez, F., Garnacho, F., Khamlichi, A., & Ortego, J. (2016). Classification of partial discharge sources by the characterization of the pulses waveform. *2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), Montpellier, France*, pp. 514-519. doi: 10.1109/ICD.2016.7547655
- Anderson, R. (1996). Select the right plastic film capacitor for your power electronic applications. *Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, 3*, 1327-1330. .
- Arora, R., & Mosch, W. (2011). Liquid Dielectrics, their Classification, Properties, and Breakdown Strength. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470947906.ch6>.
- Babrauskas, V. (2013). Arc Breakdown in Air over Very Small Gap Distances. *Conference: Interflam Volume: 2*, pp. 1489-1498.
- Beauger, A., Haussonne, J.-M., & Nipce, A.-C. (2007). Condensateurs. Dans *Techniques de l'ingénieur : Électronique (Réf : E1925 v1)* (Vol. 1). Paris: Techniques de l'ingénieur
- Berger, L. I. Dielectric strength of insulating materials.
https://www.thevespiary.org/rhodium/Rhodium/pdf/chemical-data/diel_strength.pdf
- Boggs, S. A., Ho, J., & Jow, T. R. (2010). Overview of laminar dielectric capacitors. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 26, 7-13.
- Bramouille, M. (1998). Electrolytic or film capacitors?. *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference, vol.2*, pp. 1138-1141. doi: 10.1109/IAS.1998.730290.
- Budde, M., & Kurrat, M. (2008). Partial Discharge Diagnostics of Micro Cavities in Epoxy Insulating Materials and their Modelling. *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, BC, Canada*, pp. 369-372. doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570351

- Bureau, J.-M. (2016). Propriétés diélectriques des polymères. Dans *Techniques de l'ingénieur : Électronique - Photonique Électronique (Réf. :E1850 V4)* (Vol. 4). Paris: Techniques de l'ingénieur
- Caliari, L., Bettacchi, P., Boni, E., Montanari, D., Gamberini, A., Barbieri, L., & Bergamaschi, F. (2013). KEMET film capacitors for high temperature, high voltage and high current. *CARTS International – ECA*.
- Chen, G., Zhao, J., Li, S., & Zhong, L. (2012). Origin of thickness dependent dc electrical breakdown in dielectrics. *Applied Physics Letters (AIP)*, 100, 222904. doi: 10.1063/1.4721809
- Chisca, S., Sava, I., Musteata, V., & Bruma, M. (2011). Dielectric and conduction properties of polyimide films. *CAS 2011 Proceedings (2011 International Semiconductor Conference)*, pp. 253-256. doi: 10.1109/SMICND.2011.6095784.
- Clelland, I. W., & Price, R. A. (2011). Polymer film capacitors. *Applied power and energy conversion conference*.
- Couderc, H., David, E., Corlu, Y., Fréchette, M., & Savoie, S. (2011). Dielectric breakdown of amorphous and semicrystalline polymers. *2011 Electrical Insulation Conference (EIC)*, pp. 454-458. doi: 10.1109/EIC.2011.5996197.
- D149, A. (2013). Standard Test Method for dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies. *ASTM D149 – 2009*.
- Danouj, B. (2012). *Caractérisation des signatures de décharges partielles en utilisant une nouvelle génération de coupleurs piézoélectriques* (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal, QC, Canada).
- David, É. (2010a). *Notes du cours DGA1005 Matériaux diélectriques : Chapitre 3 - Propriétés diélectriques statiques*. Montréal, QC, Canada: École de Technologie Supérieure.
- David, É. (2010b). *Notes du cours DGA 1005 Matériaux diélectriques: Chapitre 4 - Diélectrique soumis à un champ variable*. Montréal, QC, Canada: École de Technologie Supérieure.
- Diaham, S., Locatelli, M. L., Lebey, T., & Dinculescu, S. (2009). Dielectric and thermal properties of Polyamide-imide (PAI) films. *2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 482-485. doi: 10.1109/CEIDP.2009.5377778.

- El-Refaie, E. M., Elrahman, M. K. A., & Zidane, O. (2017). Effect of void position on partial discharge properties in different insulating materials. *2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Cairo, Egypt, pp. 845-850. doi: 10.1109/MEPCON.2017.8301278
- Forssen, C., & Edin, H. (2004). Influence of cavity size and cavity location on partial discharge frequency dependence [polymer insulation]. *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004.*, Boulder, CO, USA, pp. 438-441. doi: 10.1109/CEIDP.2004.1364281
- Gnonhoue, O. G., Velazquez-Salazar, A., Millard, L., Joncas, S., David, É., Cormier, L., . . . Preda, I. (2020). Characterization of Dielectric Walls of Capacitors. *2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD)*, Valencia, Spain, pp. 653-656. doi: 10.1109/ICD46958.2020.9341843
- Göttgens, S., & Sanner, W. (2005). Polysulfones (PSU, PESU, PPSU). *Kunststoffe plast europe*, 10:139–142.
- Hantouche, C. (1996). Condensateurs de puissance. Dans *Techniques de l'ingénieur : Réseaux électriques et applications (Réf : D4710 v1)* (Vol. 1). Paris: Techniques de l'ingénieur
- Heid, T. (2015). *Innovative nanostructured epoxy composites for enhanced high voltage insulation systems* (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal, QC, Canada).
- Heid, T. (2015). *Innovative nanostructured epoxy composites for enhanced high voltage insulation systems* (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal, QC, Canada).
- Ho, J. S., & Greenbaum, S. G. (2018). Polymer Capacitor Dielectrics for High Temperature Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10 (35), 29189-29218 doi: 10.1021/acsami.8b07705.
- Huan, T. D., Boggs, S., Teyssedre, G., Laurent, C., Cakmak, M., Kumar, S., & Ramprasad, R. (2016). Advanced polymeric dielectrics for high energy density applications. *Progress in Materials Science*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.05.001>
- Hyrenbach, M., & Zache, S. (2016). Alternative insulation gas for medium-voltage switchgear. *2016 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe)*, pp. 1-9. doi: 10.1109/PCICEurope.2016.7604648.
- Ida, S. (2014). PES (Poly(ether sulfone)), Polysulfone. In: Kobayashi S., Müllen K. (eds) *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*. Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-36199-9_238-1.

- IEC. (2000). High-voltage test techniques – Partial discharge measurements. *International standard IEC 60270, Third edition 2000-12*.
- IEC/IEEE. (2007). Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Breakdown Data (Adoption of IEEE Std 930-2004). *IEC 62539 First Edition 2007-07 IEEE 930*, 1-53. doi: 10.1109/IEEESTD.2007.4288250
- Illias, H., Altamimi, G., Mokhtar, N., & Arof, H. (2016). Classification of multiple partial discharge sources in dielectric insulation material using Cepstrum analysis–artificial neural network. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 12(3), p. 357-364. doi: 10.1002/tee.22385
- Illias, H. A. (2011). *Measurement and simulation of partial discharges within a spherical cavity in a solid dielectric material* (University of Southampton).
- Illias, H. A., Chen, G., & Lewin, P. L. (2009). Modelling of partial discharge activity in different spherical cavity sizes and locations within a dielectric insulation material. *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin, China*, pp. 485-488. doi: 10.1109/ICPADM.2009.5252384
- Illias, H. A., Chen, G., & Lewin, P. L. (2011). The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events. *Journal of Physics D: Applied Physics, Volume 44, Number 24*.
- Jariyanurat, K., N., P., Potivejkul, S., & Chotigo, S. (2017). Dielectric properties of natural ester based nanofluid. *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICDL.2017.8124724.
- Jin, H., Tsekmes, I., Wu, J., Mor, A. R., & Smit, J. (2017). The effect of frequency on the dielectric strength of epoxy resin and epoxy resin based nanocomposites. *2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, pp. 141-143. doi: 10.23919/ISEIM.2017.8088708.
- Kalapat, N., & Amornsakchai, T. (2012). Surface modification of biaxially oriented polypropylene (BOPP) film using acrylic acid-corona treatment: Part I. Properties and characterization of treated films. *Surface and Coatings Technology*, 207, pp.594-601.
- Kerrigan, R. M. (2011). Polymer film capacitors. *Applied power and energy conversion conference*.
- Keyrouz, M. B. (2011). *Étude des matériaux isolants d'encapsulation pour la montée en température des modules de puissance haute tension* (Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, France).

- Kreuger, F. H., Gulski, E., & Krivda, A. (1993). Classification of partial discharges. in *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 28, no. 6, pp. 917-931. doi: 10.1109/14.249365
- Küchler, A. (2018). *High Voltage Engineering* (Springer éd.).
- Kuffel, E., Zaengl, W. S., & Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering*.
- Mahanta, D. K. (2020). Green Transformer Oil: A Review. *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, pp. 1-6. doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160654.
- Mehta, D. M., Kundu, P., Chowdhury, A., Lakhiani, V. K., & Jhala, A. S. (2016a). A review of critical evaluation of natural ester vis-a-vis mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part 1. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 2, pp. 873-880. doi: 10.1109/TDEI.2015.005370.
- Mehta, D. M., Kundu, P., Chowdhury, A., Lakhiani, V. K., & Jhala, A. S. (2016b). A review of critical evaluation of natural ester vis-a-vis mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part II. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 3, pp. 1705-1712. doi: 10.1109/TDEI.2016.005371.
- Natrass, D. A. (1988). Partial Discharge Measurement and Interpretation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 4.
- Natrass, D. A. (1988). Partial discharge measurement and interpretation. in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 4, no. 3, pp. 10-23. doi: 10.1109/57.830
- Natrass, D. A. (1988). Partial discharge measurement and interpretation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 4(3), 10-23. doi: 10.1109/57.830
- Nechmi, H. E., Beroual, A., Girodet, A., & Vinson, P. (2016). Fluoronitriles/CO₂ gas mixture as promising substitute to SF₆ for insulation in high voltage applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 5, pp. 2587-2593. doi: 10.1109/TDEI.2016.7736816.
- Novák, I., Popelka, A., Chodák, I., & Sedláčik, J. (2011). Study of adhesion and surface properties of modified polypropylene.
- Omicron. (2013). MDP600 Manuel d'utilisation. *MPD600.FR.4*.
- Oommen, T. V. (2002). Vegetable oils for liquid-filled transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, no. 1, pp. 6-11. doi: 10.1109/57.675572.

- Pfeiffenberger, N., Milandou, F., Niemeyer, M., Sugawara, T., Sanner, M., & Mahood, J. (2018). High temperature dielectric polyetherimide film development. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 1, pp. 120-126. doi: 10.1109/TDEI.2018.006806.
- Preve, C., Maladen, R., & Piccoz, D. (2016). Method for validation of new eco-friendly insulating gases for medium voltage equipment. *2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, pp. 235-240. doi: 10.1109/ICD.2016.7547588.
- Qi, L., Petersson, L., & Liu, T. (2014). Review of recent activities on dielectric films for capacitor applications. *Journal of International Council on Electrical Engineering*.
- Qin, S., & Boggs, S. A. (2010a). Design of longitudinal multisection foil-film capacitors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 6, pp. 1884-1887. doi: 10.1109/TDEI.2010.5658242.
- Qin, S., & Boggs, S. A. (2010b). Limits to the performance and design of high voltage metalized film capacitors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 4, pp. 1298-1306. doi: 10.1109/TDEI.2010.5539702.
- Rabuffi, M., & Picci, G. (2002). Status quo and future prospects for metallized polypropylene energy storage capacitors. *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 30, no. 5, pp. 1939-1942. doi: 10.1109/TPS.2002.805318.
- Reed, C. W. R., & Cichanowski, S. W. (1994). The fundamentals of aging in HV polymer-film capacitors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*.
- Reuter, R. C., Jr., & Allen, J. J. (1991). Prediction of Mechanical States in Wound Capacitors. *ASME. J. Mech. Des*, 113(4), 387-392. doi: <https://doi.org/10.1115/1.2912794>
- Ritamäki, M. (2019). *Steering Capacitor Film Development with Methods for Correct and Adequate Dielectric Performance Assessment* (Academic dissertation, Tampere University, Finland).
- Romero, A., Rácz, L., Mátrai, A., Bokor, T., & Cselkó, R. (2017). A review of sulfur-hexafluoride reduction by dielectric coatings and alternative gases. *2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, pp. 1-5. doi: 10.1109/IYCE.2017.8003750.
- Rouse, T. O. (1998). Mineral insulating oil in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 6-16. doi: 10.1109/57.675572.
- Ruan, L., Yao, X., Chang, Y., Zhou, L., Qin, G., & Zhang, X. (2018). Properties and Applications of the β Phase Poly(vinylidene fluoride). *Polymers*, 10, 228.

- Rytöluoto, I., Gitsas, A., Pasanen, S., & Lahti, K. (2017). Effect of film structure and morphology on the dielectric breakdown characteristics of cast and biaxially oriented polypropylene films. *European Polymer Journal*, pp.606-624. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.08.051>.
- Sahoo, N. C., Salama, M. M. A., & Bartnikas, R. (2005). Trends in partial discharge pattern classification: a survey. in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 248-264. doi: 10.1109/TDEI.2005.1430395
- Samuel, J. G. C., Lucas, G., Fu, M., Howard, P. J., & Lafon-Placette, S. (2012). Nano-dielectrics research for application to high voltage insulation systems. *2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*.
- Samuel, J. G. C., Lucas, G., Fu, M., Howard, P. J., & Lafon-Placette, S. (2012). Nano-dielectrics research for application to high voltage insulation systems. *2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. doi: 10.1109/UPEC.2012.6398638
- Sarjeant, W. J. (1989). Capacitor fundamentals. *Proceedings of the 19th Electrical Electronics Insulation Conference*. , pp. 1-51. doi: doi: 10.1109/EEIC.1989.208190
- Sarjeant, W. J., Zirnheld, J., & MacDougall, F. W. (1998). Capacitors. *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 26, no. 5, pp. 1368-1392. doi: doi: 10.1109/27.736020
- Schneuwly, A., Groning, P., Schlapbach, L., Irrgang, C., & Vogt, J. (1998). Breakdown behavior of oil-impregnated polypropylene as dielectric in film capacitors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 5(6).
- Shete, A. R., & Thorat, A. R. (2013). An optimal technique for manufacturing of H.T. capacitor by using Metallized Polypropylene Film. *2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, pp. 177-180. doi: 10.1109/ICPEC.2013.6527646.
- Sili, E. (2012). *Etude et caractérisation des décharges partielles et du vieillissement du polyimide en environnement aéronautique* (Université Toulouse III - Paul Sabatier, Toulouse, France).
- Streibl, M., Karmazin, R., & Moos, R. (2018). Materials and applications of polymer films for power capacitors with special respect to nanocomposites. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 6, pp. 2429-2442. doi: 10.1109/TDEI.2018.007392.
- Tan, D., Zhang, L., Chen, Q., & Irwin, P. (2014). High-Temperature Capacitor Polymer Films. *Journal of Elec Materi*, 43, 4569–4575. doi: <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3440-7>.

- Tan, Q., Irwin, P., & Yang, C. (2006). Advanced Dielectrics for Capacitors. *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials, Volume 126* (Issue 11), Pages 1153-1159.
doi: <https://doi.org/10.1541/ieejfms.126.1153>.
- Teyssedre, G., & Boudou, L. (2010). Polymères et composites pour l'électrotechnique. Dans *Techniques de l'ingénieur : Conversion de l'énergie électrique (Réf : D2335 v1)* (Vol. 1). Paris: Techniques de l'ingénieur.
- Vlaeva, I., Yovcheva, T., Viraneva, A., Kitova, S., Exner, G., Guzhova, A., & Galikhanov, M. (2012). Contact angle analysis of corona treated polypropylene films. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Yin, G., Yang, Y., Song, F., Renard, C., Dang, Z., Shi, C., & Wang, D. (2017). Dielectric Elastomer Generator with Improved Energy Density and Conversion Efficiency Based on Polyurethane Composites. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 9, 5237–5243.
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b13770>.
- Yoshida, Y., & Nishimatsu, M. (1986). Power capacitors. *IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-21*(6), 963-973.
- Yoshida, Y., & Nishimatsu, M. (1986). Power capacitors. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*.
- Zhou, C., & Chen, G. (2017). Space charge and AC electrical breakdown strength in polyethylene. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, no. 1, pp. 559-566. doi: 10.1109/TDEI.2016.005811.

