

Développement d'un condensateur sec haute tension

par

Romain POUDRET

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

MONTREAL, LE 30 AOÛT 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Romain POUDRET, 2019



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. Simon Joncas, directeur de mémoire
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

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

M. Christian Belleau, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Nicole R. Demarquette, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

LE 29 AOÛT 2019

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur Simon Joncas pour sa disponibilité et pour son implication, que j'ai grandement apprécié au cours de ma maîtrise. Je remercie également mon codirecteur Éric David pour sa supervision et son apport à mon travail de recherche.

Je remercie l'entreprise Condis pour avoir permis le développement de ce projet, et notamment Damien Frioud pour son investissement et sa réactivité à répondre à mes questions.

Je remercie tout particulièrement Laurent Cormier, qui a participé activement à ce travail de recherche, et au contact de qui j'ai beaucoup appris, tout au long de l'année et demie à travailler en sa compagnie.

Je remercie également mes collègues Louis Charles Forcier, Mathieu Prudhomme et Louis Chevallier pour leur sympathie et pour avoir partagé ensemble les joies de la recherche, les hauts et les bas.

J'ai une pensée pour tous mes amis du Québec avec qui j'ai pu décompresser en dehors de la réalisation de ce mémoire. Je remercie enfin ma famille et mes proches pour leur soutien dans cette aventure, ainsi que toute les personnes dont j'ai croisé la route et qui ont participé à ce que mon expérience au Canada soit aussi enrichissante.

Développement d'un condensateur sec haute tension

Romain POUDRET

RÉSUMÉ

Les condensateurs haute tension utilisés sur les réseaux de distribution d'électricité contiennent des huiles diélectriques synthétiques. Ces huiles présentent un risque environnemental et de nouvelles normes pourraient interdire leur utilisation. Dans ce contexte, l'entreprise Condis souhaite développer un condensateur sec haute tension dont les performances électriques égalent celles obtenues avec la technologie imprégnée d'huile diélectrique.

Ce mémoire présente le développement et l'évaluation du potentiel de deux technologies de condensateurs secs haute tension. La première technologie utilise des matériaux composites préimprégnés et la deuxième consiste à imprégner un condensateur bobiné avec des résines therm durcissables. Des mesures par spectroscopie, des mesures de décharges partielles et des essais de claquage ont été réalisés afin d'évaluer les propriétés électriques des condensateurs.

Dans un premier temps, des condensateurs plats laminés ont été fabriqués à partir de plusieurs préimprégnés sélectionnés dans le commerce. La tenue au claquage des condensateurs laminés est encourageante pour une version préliminaire bien que cette technologie présente de nombreux défis de fabrication pour produire un prototype.

Des enroulements capacitifs ayant des murs diélectriques de compositions différentes ont été imprégnés par procédé VPI (Vacuum Pressure Impregnation) avec une résine époxy et une résine silicone. Un traitement corona des films de polypropylène a permis de diminuer de façon significative le niveau de décharges partielles par rapport à un film non traité. Des observations au microscope optique ont été effectuées afin d'identifier l'origine des décharges à l'intérieur du mur diélectrique. Des prototypes de condensateur de plus grande échelle ont été fabriqués avec le même procédé. Ces prototypes ont mis en évidence un problème de fissuration, résolue par l'utilisation d'un plastifiant dans le mélange de la résine.

Enfin, un modèle élément fini 2D de condensateur a été réalisé afin d'étudier l'influence de la configuration des électrodes sur la distribution du champ. Les simulations ont montré qu'une configuration à électrodes décalées engendre une concentration de champs en extrémité d'électrode 40% supérieure à la concentration observée dans le cas d'électrodes alignées.

Les prototypes fabriqués par procédé VPI démontrent de bonnes performances électriques bien que leur niveau de décharges partielles soit encore trop important par rapport aux requis de l'industriel.

Mots clés : condensateur, haute tension, préimprégné, VPI, claquage, décharges partielles

Development of a Dry High Voltage Capacitor

Romain POUDRET

ABSTRACT

High voltage capacitors used in electricity distribution networks contain synthetic dielectric oils. These oils have a serious impact on the environment and new standards may prohibit their use. In this context, the company Condis wants to develop a dry high voltage capacitor whose electrical performances are equal to those obtained with a dielectric oil impregnated technology.

This thesis presents the development and the evaluation of two technologies for dry high voltage capacitors. The first technology uses prepreg composite materials and the second technology is based on the impregnation of a capacitor with thermoset resins. Spectroscopy measurements, partial discharges and dielectric breakdown tests were performed to evaluate the performances of these two technologies.

First, prepreg based capacitors were laminated from several commercially selected prepreps. The breakdown strength of laminated capacitors is encouraging for a preliminary version although this technology presents many manufacturing challenges for producing a prototype.

Capacitive windings with different dielectric wall compositions were impregnated by VPI (Vacuum Pressure Impregnation) process with an epoxy resin and a silicone resin. Corona treatment of the polypropylene films proved to reduce significantly the level of partial discharges when compared to untreated films. Optical microscopic observations were made to identify the origin of the discharges in the dielectric wall. Larger scale capacitor prototypes were manufactured using the same process. These prototypes revealed cracks that were solved by adding a flexibilizer in the resin mixture.

Finally, a 2D finite element model was realized in order to study the influence of the configuration of the electrodes on the electrical field distribution. Simulations have shown that an offset electrode configuration results in a concentration of fields at the electrode edge 40% higher than the concentration observed in the case of aligned electrodes.

Prototypes manufactured by VPI process demonstrate good electrical performances although the level of partial discharges is high when compared to expected industrial standards.

Key words : capacitor, high voltage, prepreg, VPI, dielectric breakdown, partial discharges

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES CONDENSATEURS	
HAUTE TENSION	3
1.1 Les matériaux diélectriques	3
1.1.1 Polarisation électrique	3
1.1.2 Influence de la température et de la fréquence sur la polarisation	7
1.2 Propriétés diélectriques d'un condensateur	8
1.2.1 Capacité électrique	9
1.2.2 Impédance du condensateur	12
1.2.3 Tangente de l'angle de perte	13
1.3 Mécanisme de rupture diélectrique dans un condensateur :	14
1.3.1 Rupture diélectrique dans les matériaux diélectriques solides.....	14
1.3.2 Rigidité diélectrique et claquage	15
1.3.3 Décharges partielles internes.....	16
1.4 Conception de condensateurs haute tension	20
1.4.1 Condensateur plat multidiélectrique	21
1.4.2 Condensateurs à électrodes laminées	23
1.4.3 Condensateurs à électrodes métallisées	24
1.5 Matériaux diélectriques utilisés dans les condensateurs haute tension.....	27
1.5.1 Matériaux diélectriques imprégnés par une huile diélectrique	27
1.5.2 Matériaux diélectriques pour conception sèche	31
1.5.3 Traitement corona pour film polymère	33
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	35
2.1 Caractéristiques du condensateur sec haute tension à concevoir.....	35
2.1.1 Composition d'une partie active de condensateur haute tension imprégnée d'huile diélectrique.....	36
2.1.2 Caractéristique des prototypes à concevoir.....	39
2.2 Méthode de caractérisation des propriétés des condensateurs	41
2.2.1 Mesure préliminaire de la capacité et de la résistance	41
2.2.2 Mesure de la température de transition vitreuse par calorimétrie différentielle à balayage	41
2.2.3 Mesure des propriétés diélectriques par spectroscopie	42
2.2.4 Mesures de décharges partielles.....	43
2.2.4.1 Montage de mesure des décharges partielles	43
2.2.4.2 Protocole de mesure des décharges partielles	45
2.2.5 Essai de claquage diélectrique	46

2.2.5.1	Mesure de la rigidité diélectrique d'un matériau solide dans un bain d'huile	46
2.2.5.2	Essai de claquage de condensateur plat	48
2.2.5.3	Essai de claquage de condensateur VPI.....	49
2.3	Présentation du procédé de fabrication VPI.....	50
CHAPITRE 3 CONDENSATEUR MONOLITHIQUE LAMINÉ		53
3.1	Introduction.....	53
3.2	Conception d'un condensateur monolithique laminé	53
3.3	Choix et caractérisation de préimprégnés	56
3.3.1	Caractérisation par spectroscopie des effets des conditions de polymérisation sur propriétés diélectriques du DPF 1/50/1	58
3.3.2	Caractérisation des effets des conditions de polymérisation sur la rigidité diélectrique du DPF 1/50/1	63
3.4	Méthode de fabrication des condensateurs plats laminés	66
3.4.1	Configuration des empilements.....	67
3.4.2	Paramètres de fabrication	72
3.4.3	Problème d'adhésion entre le film de polypropylène et la résine époxy .	75
3.5	Essais électriques	75
3.5.1	Spectroscopie diélectrique	76
3.5.2	Essai de claquage	78
3.6	Conclusion sur le potentiel de la technologie de condensateur monolithique laminé haute tension	80
CHAPITRE 4 ENROULEMENT CAPACITIF IMPRÉGNÉ PAR PROCÉDÉ VPI		83
4.1	Concept d'un condensateur imprégné par procédé VPI	83
4.2	Choix et caractérisation des résines d'imprégnation	83
4.2.1	Résine époxy CY 192.....	83
4.2.2	Résine silicone Silres H62 C.....	86
4.2.3	Caractérisation de la température de transition vitreuse des résines.....	87
4.2.4	Mesure de la rigidité diélectrique et de la permittivité des résines époxy CY 192 avec plastifiant et silicone Silres H62 C	89
4.3	Méthode de fabrication d'un condensateur par procédé VPI.....	92
4.3.1	Préparation de condensateur avant imprégnation	92
4.3.2	Montage d'imprégnation de condensateur par procédé VPI.....	95
4.3.3	Description des différents condensateurs imprégnés et de leurs paramètres de fabrication	98
4.3.4	Vaporisation du durcisseur Aradur HY 918 lors du dégazage.....	102
4.3.5	Fissuration de la résine silicone Silres H62 C.....	103
4.4	Essais électriques	104
4.4.1	Spectroscopie diélectrique	105
4.4.2	Mesure et analyse des décharges partielles.....	107
4.4.3	Essai de claquage des condensateurs VPI.....	113

4.4.4	Étude de la rigidité diélectrique du polypropylène et du papier imprégné de résine époxy CY 192 sans plastifiant	116
4.5	Observation de l'imprégnation des murs diélectriques en résine époxy CY 192 avec plastifiant	119
4.5.1	Observation du mouillage du papier par la résine époxy CY 192	119
4.5.2	Observation du mouillage des murs à diélectrique mixte par la résine époxy CY 192	125
4.6	Discussion sur l'influence des paramètres de fabrication sur les caractéristiques électriques des condensateurs imprégnés.....	128
4.7	Conclusion sur le potentiel de la technologie de condensateur imprégné par procédé VPI	130
CHAPITRE 5 PARTIE ACTIVE IMPRÉGNÉE PAR PROCÉDÉ VPI.....		131
5.1	Introduction.....	131
5.2	Méthode de fabrication des prototypes	131
5.2.1	Description des différents prototypes imprégnés.....	131
5.2.2	Paramètres de fabrication des condensateurs imprégnés	133
5.2.3	Fissuration des prototypes imprégnés en résine époxy CY 192 sans plastifiant.....	133
5.3	Essais électriques	134
5.3.1	Spectroscopie diélectrique	135
5.3.2	Mesure et analyse de décharges partielles	136
5.3.3	Essai de claquage	137
5.4	Observation de l'imprégnation des extrémités des électrodes.....	139
5.5	Conclusion sur la fabrication des prototypes fabriqués par procédé VPI.....	141
CHAPITRE 6 DISTRIBUTION DU CHAMP ÉLECTRIQUE ET DES EFFETS DE BORDS DANS UN CONDENSATEUR IMPRÉGNÉ PAR PROCÉDÉ VPI		143
6.1	Contexte de l'étude de la distribution de champ dans les condensateurs imprégnés.....	143
6.2	Méthodologie	144
6.2.1	Paramètres physiques	144
6.2.2	Modèle éléments finis	145
6.2.3	Maillage et convergence	147
6.2.4	Validation analytique des modèles EF	149
6.3	Analyse de l'effet de la configuration des électrodes sur la distribution du potentiel	149
6.4	Analyse de l'effet de la configuration des électrodes sur la distribution de champ électrostatique	151
6.5	Conclusions des simulations éléments finis.....	154
CONCLUSION		157
ANNEXE I MÉTHODE DE FABRICATION DES CONDENSATEURS PLATS..		159

ANNEXE II	PARAMÈTRES DE FABRICATIONS DES CONDENSATEURS IMPRÉGNÉS PAR PROCÉDÉ VPI.....	161
ANNEXE III	HISTOGRAMMES DE MESURE DE DÉCHARGES PARTIELLES DES CONDENSATEURS IMPRÉGNÉS PAR PROCÉDÉ VPI.....	163
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		166

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Quelques valeurs typiques de permittivités relatives.....6
Tableau 1.2	Caractéristiques des huiles utilisées dans les condensateurs de puissance29
Tableau 1.3	Permittivité relative et perte diélectriques des murs diélectriques imprégnés utilisés dans les condensateurs en électronique de puissance ..30
Tableau 1.4	Propriétés des polymères utilisés comme films dans des condensateurs...32
Tableau 2.1	Dimensions du condensateur imprégné d'huile diélectrique35
Tableau 2.2	Caractéristiques électriques du condensateur imprégné d'huile diélectrique36
Tableau 2.3	Caractéristiques électriques attendues pour un prototype sec.....40
Tableau 3.1	Préimprégnés sélectionnés pour la fabrication de condensateurs plats57
Tableau 3.2	Influence du cycle de polymérisation sur l'approximation des paramètres de Weibull du DPF 1/50/165
Tableau 3.3	Récapitulatif des séries fabriquées et les préimprégnés associés.....68
Tableau 3.4	Configuration et pression effective pour chaque série de fabrication.....74
Tableau 3.5	Paramètres de fabrications74
Tableau 3.6	Résistance et capacité des condensateurs plats mesurées au multimètre...76
Tableau 3.7	Tension de claquage et rigidité diélectriques des condensateurs plats laminés78
Tableau 3.8	Nombre de couches capacitives et épaisseur d'une sous unité monolithique de 72 nF et de surface active 2500 mm ² pour différentes épaisseurs de diélectrique81

Tableau 4.1	Description des proportions des réactifs dans les mélanges de la résine époxy CY 192 et de la résine époxy CY 192 avec plastifiant DY 040.....	84
Tableau 4.2	Propriétés diélectriques du mélange de 100 PHR de résine époxy Araldite CY 192-1 et de 100 PHR de durcisseur Aradur HY 918.....	85
Tableau 4.3	Viscosités et temps de gel estimé du mélange de résine CY 192 sans plastifiant DY 040.....	85
Tableau 4.4	Propriétés diélectriques de la résine silicone Silres H62 C.....	86
Tableau 4.5	Viscosités et temps de gel de la résine silicone Silres H62 C.....	87
Tableau 4.6	Paramètres de Weibull de la résine CY 192 avec plastifiant et de la résine Silres H62 C	91
Tableau 4.7	Permittivité relative des résines à 60 Hz.....	92
Tableau 4.8	Facteur d'augmentation de capacité pour des bobines à diélectrique mixte avec les résines d'imprégnation.....	94
Tableau 4.9	Matériau et épaisseur des couches des murs diélectriques	99
Tableau 4.10	Références et longueurs actives des condensateurs imprégnés	100
Tableau 4.11	Configuration des condensateurs VPI fabriqués.....	101
Tableau 4.12	Caractéristiques électriques attendues pour une bobine VPI.....	104
Tableau 4.13	Capacité des bobines VPI à 60 Hz et augmentation de leur capacité	106
Tableau 4.14	Tension de claquage, épaisseur de diélectrique et rigidité diélectrique des bobines imprégnées	114
Tableau 4.15	Paramètres de Weibull du papier imprégné par la résine époxy CY 192	117
Tableau 4.16	Rigidités diélectriques du papier et du PPR sec puis imprégnés d'huile diélectrique Jarylec	118
Tableau 4.17	Température et temps avant imprégnation.....	129
Tableau 5.1	Caractéristiques des séries de prototypes fabriqués.....	132

Tableau 5.2	Description de la structure des prototypes	133
Tableau 5.3	Caractéristiques électriques attendues pour un prototype sec.....	134
Tableau 5.4	Tension de claquage des prototypes et rigidité diélectrique ramenée à une bobine	138
Tableau 6.1	Propriétés des matériaux	144
Tableau 6.2	Caractéristiques géométriques	145
Tableau 6.3	Solutions analytiques et éléments finis du champ	149
Tableau 6.4	Champs électrostatique simulé (kV/mm) dans le milieu des couches des murs diélectriques mixte pour un potentiel de 1,5 kV et les rigidités diélectriques associées	153

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Charges libres sur les électrodes d'un condensateur vide.....4
Figure 1.2	Charges libres et liées sur les électrodes d'un condensateur avec un matériau diélectrique.....5
Figure 1.3	Coupe transversale d'un condensateur plat.....10
Figure 1.4	Diagramme de Fresnel d'un condensateur avec un matériau diélectrique imparfait.....13
Figure 1.5	Représentation a) et circuit équivalent b) d'une décharge partielle dans une couche de matériau diélectrique solide17
Figure 1.6	Récurrence de décharges partielles dans une vacuole soumise à une tension alternative18
Figure 1.7	Exemple d'histogramme de décharges partielles.....20
Figure 1.8	Coupe transversale d'un condensateur plat multidiélectrique22
Figure 1.9	Enroulement d'un condensateur multi section.....24
Figure 1.10	Condensateur bobiné à électrodes métallisées26
Figure 1.11	Isolement d'un défaut lors du claquage d'un condensateur à électrodes métallisées.....27
Figure 2.1	Photo de parties actives de condensateur haute tension.....36
Figure 2.2	Photo d'une bobine prélevée dans une partie active37
Figure 2.3	Obtention d'un condensateur bobiné à partir d'un condensateur plat37
Figure 2.4	Configuration des électrodes alignées et décalées pour une bobine diélectrique mixte.....39
Figure 2.5	Système de mesure de décharges partielles44

Figure 2.6	Montage de la mesure de rigidité diélectrique.....	47
Figure 2.7	Schéma du montage de l'essai de claquage des condensateurs plats.....	49
Figure 2.8	Étapes successives de la fabrication d'un condensateur sec par procédé VPI	51
Figure 3.1	Condensateur monolithique formé de N couches capacitives	54
Figure 3.2	Variation de $\tan(\delta)$ en fonction de la fréquence et de la température du DPF 1/50/1 polymérisé à 105 °C pendant 3 h.....	59
Figure 3.3	Variation de $\tan(\delta)$ en fonction de la fréquence et de la température du DPF 1/50/1 polymérisé à 120 °C pendant 1 h 30 min	60
Figure 3.4	Comparaison de $\tan(\delta)$ en fonction de la température à 67 Hz du DPF 1/50/1 polymérisé à 120 °C pendant 1 h 30 min et à 105 °C pendant 3 h.....	61
Figure 3.5	Évolution de $\tan(\delta)$ du DPF 1/50/1 non polymérisé maintenu à 90 °C pendant 5 heures	62
Figure 3.6	Évolution de $\tan(\delta)$ à 67 Hz du DPF 1/50/1 non polymérisé maintenu à 90 °C pendant 5 heures	63
Figure 3.7	Diagrammes de Weibull avec intervalles de confiance à 90% pour les différents cycles de cuisson du DPF 1/50/1	64
Figure 3.8	Moulage de condensateurs plats FM300 lors d'un essai de tenu du vide du sac	67
Figure 3.9	Nomination et configuration des empilements des condensateurs plats....	69
Figure 3.10	(a) préimprégné de Laminé 1 et (b) configuration de condensateur plat, (c) en vue de coupe A-A et en (d) vue de coupe B-B	71
Figure 3.11	Photo des défauts du Laminé 1	72
Figure 3.12	Schéma du moulage par compression sous vide avec contre plaque.....	73
Figure 3.13	Délamination entre l'électrode d'aluminium.....	75

Figure 3.14	Capacité et $\tan\delta$ des condensateurs plats laminés sur la plage de fréquence de 1 Hz à 10^3 Hz.....	77
Figure 3.15	Condensateur LAM_06_B après claquage.	79
Figure 4.1	Cycle de cuisson utilisé pour les deux mélanges de résine époxy CY 192	86
Figure 4.2	Flux de chaleur en fonction de la température (endothermique vers le haut)	88
Figure 4.3	Échantillons prélevés sur une plaque de résine CY 192	89
Figure 4.4	Diagramme de Weibull avec intervalles de confiance à 90% pour la résine CY 192 avec plastifiant et la résine Silres H62 C	90
Figure 4.5	Enroulement capacitif avec ses connexions avant imprégnation.....	92
Figure 4.6	Vue de dessus du montage d'une bobine dans le moule de fabrication.....	93
Figure 4.7	Courbes de compression pour deux bobines tout papier	94
Figure 4.8	Montage de fabrication des bobines VPI à	96
Figure 4.9	Montage de fabrication à l'arrière de l'étuve.....	97
Figure 4.10	VPI 18 après démoulage a) vu de face, b) vue de profil.....	102
Figure 4.11	Fissurations sur VPI 23	104
Figure 4.12	Capacité et $\tan\delta$ des bobines VPI de 1 Hz à 10^3 Hz.....	105
Figure 4.13	Mesures de décharges partielles de VPI 22 à $U_{nominale} = 1,5$ kV.....	108
Figure 4.14	Mesures de décharges partielles de VPI 28 à $U = 1,6$ kV.....	109
Figure 4.15	Mesures de décharges partielles de VPI 24 à $U_{nominale} = 1,5$ kV avant....	109
Figure 4.16	Mesures de décharges partielles de VPI 26 à $U_{nominale} = 1,5$ kV.....	110
Figure 4.17	Mesures de décharges partielles de VPI 27 à $U_{nominale} = 1,5$ kV.....	110

Figure 4.18	VPI 24 (a) avant claquage et (b) après claquage. Le cercle rouge indique le lieu du claquage115
Figure 4.19	Diagramme de Weibull avec intervalles de confiance à 90% pour du papier imprégné par la résine époxy CY 192 sans plastifiant et pour du PPR117
Figure 4.20	PPR non imprégné à un grossissement de 100X120
Figure 4.21	Papier imprégné de résine époxy CY 192 : a) à un grossissement de 100X et b) à un grossissement de 500 X.....121
Figure 4.22	Papier non imprégné a) à un grossissement de 100X et b) à un grossissement de 500 X122
Figure 4.23	Coupes transversale de VPI 24 : a) à un grossissement de 200X et b) à un grossissement de 500X124
Figure 4.24	Coupe transversale de VPI 22 : a) à un grossissement de 500X et b) à un grossissement de 1000X126
Figure 4.25	Coupe transversale de VPI 26 : a) à un grossissement de 500X et b) à un grossissement de 1000X127
Figure 5.1	PA a) de la série 1 avec cadre en PCB, b) de la série 2 avec cadre en presspahn.....132
Figure 5.2	Fissure pénétrant dans la PA du prototype 1134
Figure 5.3	Capacité et $\tan\delta$ des prototypes de 1 Hz à 10^3 Hz.....135
Figure 5.4	Mesures de décharges partielles du prototype 11 à $U_{nominale} = 15$ kV.....136
Figure 5.5	Mesures de décharges partielles du prototype 12 à $U_{nominale} = 15$ kV.....137
Figure 5.6	Observation des extrémités des électrodes du prototype 12 a) à un grossissement de 500X et b) à un grossissement de 1000X140
Figure 6.1	Géométrie du modèle à électrodes alignées.....146
Figure 6.2	Maillage de $2\ \mu\text{m}$ sur le modèle à électrode alignée a) vue de toutes les couches, b) vue rapprochée d'une pellicule d'époxy148

Figure 6.3	Distribution du potentiel électrostatique en kV pour a) des électrodes alignées, b) des électrodes décalées150
Figure 6.4	Distribution du champ électrostatique en kV/mm pour a) des électrodes alignées, b) des électrodes décalées152

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AC	Courant alternative
BDS	<i>Broadband dielectric spectroscopy</i>
BOPP	<i>Biaxially oriented polypropylene</i>
DP	Décharges partielles
EF	Éléments finis
HT	Haute tension
M/DBT	Mono-di benzyl-toluène
PA	Partie active
PC	Polycarbonate
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PET	Polyéthylène téréphtalate
PHR	<i>Per hundred resin</i>
PP	Polypropylène
PPR	Polypropylène rugueux
PPS	Polyphénylène sulfite
PXE	Phényl-xyly-éthane
RMS	<i>Root mean square</i>
VPI	<i>Vacuum pressure impregnation</i>
2D	Deux dimensions

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Variables latines

A	Surface active du condensateur [m ²]
$A_{condensateur}$	Surface supérieure des condensateurs [m ²]
$A_{contre plaque}$	Surface de la contreplaque [m ²]
V_a	Tension alternative dans le matériau diélectrique non altéré [V]
V_c	Tension alternative dans la cavité [V]
C	Capacité du condensateur [F]
C_a	Capacité de la portion de matériau diélectrique non altérée [F]
C_b	Capacité de la portion de matériau complémentaire à la cavité [F]
C_c	Capacité de la cavité [F]
C_k	Condensateur de couplage
C_{eq}	Capacité équivalente du condensateur [F]
C_0	Capacité sous vide [F]
C'	Capacité réelle
C''	Capacité imaginaire
d	Épaisseur du mur diélectrique [m]
d_i	Épaisseur du matériau i [m]
D	Épaisseur de l'électrode [m]
e	Épaisseur de la sous unité [m]
D	Taux quadratique sur la période de référence [C ² .s ⁻¹]
E_a	Énergie d'activation [J]
E_c	Champ électrique dans la cavité [kV.mm ⁻¹]
E_i	Potentiel appliqué au matériau i [V]
E_{bd}	Champ de claquage [kV.mm ⁻¹]
f	Fréquence de fonctionnement du condensateur [Hz]
I	Amplitude du courant alternatif [A]
I_{Dis}	Courant de décharge moyen sur la période de référence [C.s ⁻¹]
k	Constante de Boltzmann [J.K ⁻¹]
n	Taux de répétition d'impulsion moyen [kDP.s ⁻¹]
n	Nombre de condensateurs en série
N	Nombre de couches de préimprégné
P_d	Contribution différée de la polarisation [C.m ⁻²]
P_{Dis}	Puissance de décharge moyenne sur la période de référence [W]
P_1	Pression au cours du séchage [bar]
P_2	Pression au cours du dégazage [bar]
P_3	Pression au cours du transfert [bar]
P_4	Pression au cours de l'imprégnation [bar]
P_∞	Polarisation instantanée [C.m ⁻²]
Q	Charge électrique [C]

Q_{avg}	Valeur de décharge moyenne sur la période de référence [C]
Q_{peak}	Valeur de la décharge la plus élevée sur la période de référence [C]
S	Surface du condensateur [m ²]
t	Diamètre de la cavité [m]
t_1	Temps de séchage [h]
t_2	Temps de dégazage [min]
t_3	Temps de transfert [min]
t_4	Temps d'imprégnation [min]
t_{Ref}	Période de référence [s]
$\tan\delta$	Tangente de l'angle de perte
T	Température [°C]
T_c	Température de polymérisation [°C]
T_g	Température de transition vitreuse [°C]
T_1	Température au cours du séchage [°C]
T_2	Température au cours du dégazage [°C]
T_3	Température au cours du transfert [°C]
T_4	Température au cours de l'imprégnation [°C]
V	Tension appliquée [V]
V_{bd}	Tension de claquage [V]
$V_{nominale}$	Tension nominale [V]
V_{test}	Tension de test [V]
V^+	Tension de claquage de la cavité dans le phase positive [V]
V^-	Tension de claquage de la cavité dans la phase négative [V]
Z	Impédance du condensateur [Ω]

Variables grecques

α	Relaxation alpha
α	Facteur d'échelle [kV.mm ⁻¹]
β	Relaxation beta
β	Facteur de forme
γ	Relaxation gamma
ε	Permittivité [F.m ⁻²]
ε_r	Permittivité relative
ε_s	Permittivité électrique statique [F.m ⁻²]
ε_i	Permittivité relative du matériau i [F.m ⁻²]
ε_0	Permittivité du vide [F.m ⁻²]
ε_∞	Permittivité électrique à fréquence infinie [F.m ⁻²]
ε'_r	Partie réelle de la permittivité
ε''_r	Partie imaginaire de la permittivité
σ	Conductivité du matériau [$\Omega.m$] ⁻¹
σ_0	Densité de charges libres [C.m ⁻³]

σ_p	Densité de charges liées [C.m ⁻³]
τ	Temps de relaxation [s]
φ	Phase du signal de tension [rad]
χ	Susceptibilité électrique
ω	Pulsation du champ électrique [rad.s ⁻¹]

Vecteurs

\vec{E}	Vecteur du champ électrique statique
\vec{E}_l	Vecteur potentiel généré par les dipôles permanents et induits
\vec{D}	Vecteur densité totale de charge
\vec{I}_c	Vecteur du courant capacitif
\vec{I}_p	Vecteur du courant de perte d'énergie
\vec{P}	Vecteur du champ de polarisation

Variables Complexes

C^*	Capacité complexe
E^*	Tension complexe
I^*	Courant complexe

Unités de mesure

°C	Degré Celsius
h	Heure
min	Minute
s	Seconde
Pa	Pascal
bar	Bar
N	Newton
V	Volt
A	Ampère
W	Watt
C	Coulomb
F	Farad
m	Mètre
m ²	Mètre carré
Hz	Hertz
Ω	Ohm
g	Gramme
rad	Radian

INTRODUCTION

Les condensateurs haute tension sont des éléments essentiels aux réseaux de distribution d'électricité. Ils permettent de compenser l'énergie réactive créée lors de la génération de l'électricité ou assurent la distribution uniforme de la tension dans les chambres de disjoncteurs haute tension. Ces condensateurs fonctionnent à des fréquences de 50 Hz ou 60 Hz et à des tensions alternatives (AC) comprises supérieures à 60 kV.

La technologie de condensateur haute tension dominant actuellement le marché est la technologie imprégnée d'huile : le mur isolant du condensateur est composé de plusieurs couches de films diélectriques imprégnés par une huile diélectrique. Cependant, ces huiles synthétiques ou minérales, ont un impact néfaste sur l'environnement, et pourraient être frappées d'interdiction par de futures normes de protection de l'environnement. Ces huiles présentent aussi un danger pour la santé des opérateurs en contact direct avec ces dernières lors du processus de fabrication des condensateurs.

Dans ce contexte, l'entreprise Condis s'est associée avec l'École de technologie supérieure afin de développer un prototype de condensateur sec haute tension à partir de matériaux diélectriques polymères ou composites disponibles dans le commerce. Deux conceptions de condensateur sec ont été étudiées au cours de cette maîtrise. La première conception consiste en un condensateur monolithique fabriqué à partir de couches de matériaux composites préimprégnés et d'électrodes d'aluminium laminées. La deuxième conception est basée sur l'utilisation d'une résine thermodurcissable à faible viscosité en remplacement de l'huile diélectrique des condensateurs actuellement commercialisés par Condis. Ces condensateurs sont imprégnés par procédé VPI.

Le mémoire comporte six chapitres. Le premier chapitre présente une revue de littérature faisant un état de l'art des différentes technologies et matériaux utilisés dans les condensateurs haute tension.

Le deuxième chapitre passe en revue les caractéristiques attendues du condensateur sec haute tension à fabriquer et détaille la méthodologie de caractérisation des propriétés électriques des condensateurs fabriqués.

Le troisième chapitre traite de l'évaluation de condensateurs monolithiques laminés. Plusieurs condensateurs plats ont été produits et le potentiel de cette technologie a été évalué à partir des mesures de leurs performances électriques.

Le chapitre 4 détaille l'imprégnation d'enroulements capacitifs simple par procédé VPI. Plusieurs compositions de mur diélectriques ont été étudiées et leurs propriétés électriques ont été testées afin d'identifier une isolation sèche adaptée à l'application haute tension.

Dans le chapitre 5, des condensateurs de plus grande envergure ont été fabriqués à partir de parties actives imprégnées par procédé VPI. Leurs propriétés électriques ont ensuite été caractérisées.

Enfin, le chapitre 6 présente l'étude de la distribution du champ électrique et des effets de bords à partir d'un modèle éléments finis 2D de condensateurs fabriqués par procédé VPI. La distribution de champ a été modélisée pour des agencements d'électrodes différents.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES CONDENSATEURS HAUTE TENSION

1.1 Les matériaux diélectriques

Le concept de matériau diélectrique a été introduit par Faraday afin de désigner une substance dont la propriété électromagnétique fondamentale est d'être polarisable sous l'action d'un champ électrique (Fournié, 1986).

1.1.1 Polarisation électrique

Les matériaux diélectriques sont caractérisés par une absence de charges libres dans leur volume constituant. Néanmoins, il est possible que les molécules dipolaires ou les chaînes constituant un matériau polymère aient un mouvement de déplacement local sous l'action d'un champ électrique extérieur important. Ce mécanisme de déformation de la répartition des charges électriques est nommé phénomène de polarisation (Bureau, 2016). Ce mouvement local génère une variation de charge sur les électrodes, se matérialisant physiquement par un courant entre les deux électrodes du condensateur appelé courant de déplacement de polarisation. (David, 2010a).

Afin d'illustrer plus en détail le phénomène de polarisation, prenons le cas d'un condensateur plan parfait représenté par deux électrodes séparées par le vide délimité par la surface fermée S et soumis à un champ électrique statique \vec{E} . D'après la loi de Gauss ci-dessous, une densité de charge σ_0 correspondant aux charges libres nécessaires au maintien du champ \vec{E} apparaît sur les électrodes, comme représentée sur la Figure 1.1 (Jonscher, 1983).

$$\oint_S \varepsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S \sigma_0 \cdot dS \quad (1.1)$$

Où ϵ_0 est la permittivité du vide ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m).

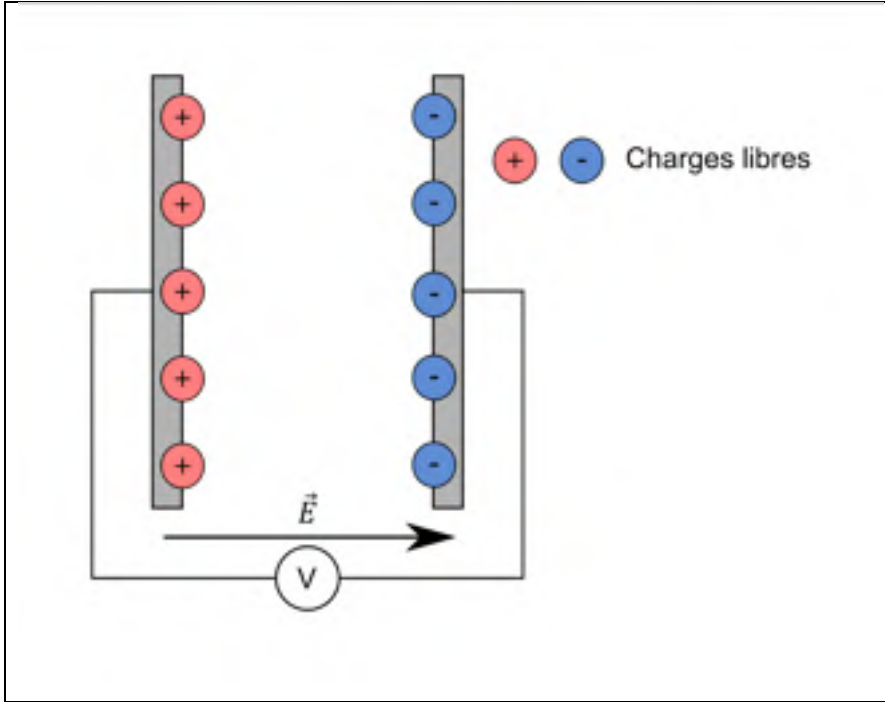


Figure 1.1 Charges libres sur les électrodes d'un condensateur vide

On note le vecteur densité de charge sous vide ou induction électrique :

$$\vec{D}_0 = \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (1.2)$$

Lorsque l'on introduit un matériau diélectrique entre les électrodes de ce même condensateur comme représenté sur la Figure 1.2, on observe l'apparition de charges liées dues au phénomène de polarisation. Le potentiel généré par les dipôles permanents et les dipôles induits (noté \vec{E}_l) contenus dans la surface fermée S du matériau diélectrique est équivalent au potentiel que générerait une densité surfacique de charges liées σ_p sur les électrodes. Cette densité correspond aux charges liées qui compensent le champ créé par le phénomène de polarisation. On obtient alors un nouveau terme dans la loi de Gauss :

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \oint_S \sigma_0 \cdot dS + \oint_S \sigma_p \cdot dS = \oint_S \epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{S} + \oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S} \quad (1.3)$$

Avec \vec{D} le vecteur densité totale de charge appelé aussi induction et \vec{P} le vecteur traduisant le phénomène de polarisation.

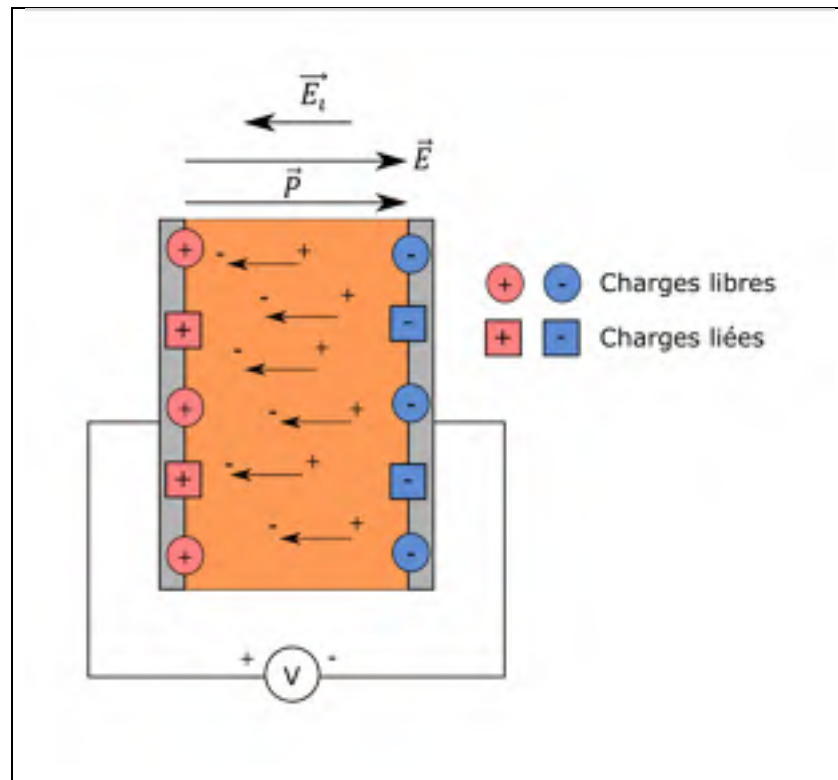


Figure 1.2 Charges libres et liées sur les électrodes d'un condensateur avec un matériau diélectrique

Comme pour la plupart des matériaux isolants utilisés en électrotechnique, si nous considérons le matériau diélectrique comme homogène, isotrope et ayant un comportement diélectrique linéaire. La relation entre \vec{P} et \vec{E} s'exprime alors de la manière suivante :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \cdot \chi \cdot \vec{E} \quad (1.4)$$

Avec la constante χ appelée susceptibilité électrique du matériau (Fournié, 1986). On déduit de l'équation :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{E} \quad (1.5)$$

On peut alors définir la permittivité du matériau diélectrique par :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot (1 + \chi) \quad (1.6)$$

Et on note ε_r la permittivité relative ou constante diélectrique du matériau pour quantifier l'importance des mécanismes de polarisation d'un matériau diélectrique. On utilisera le terme de permittivité par la suite pour désigner la permittivité relative d'un matériau. Le Tableau 1.1 donne un exemple de valeurs typiques de permittivités relatives.

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = (1 + \chi) \quad (1.7)$$

Tableau 1.1 Quelques valeurs typiques de permittivités relatives
Adapté de Fournié (1986, p.15)

Matériau	ε_r	Conditions de tests
Air	1,000536	20 °C, 1 atm
SF ₆	1,002084	20 °C, 1 atm
Huiles minérales	2,2	25 °C
Polypropylène	2,2	25 °C
Verre	4,0-7,5	25 °C
Mica	6-11	25 °C
Résines époxydes	3,0-11	Chargées ou non
Cellulose « Kraft » ou papier	5,9	fibres

1.1.2 Influence de la température et de la fréquence sur la polarisation

Lorsqu'un champ électrique est appliqué à un matériau diélectrique, les dipôles le constituant ne s'orientent pas instantanément. Le phénomène de polarisation a lieu avec un retard dans le temps de la forme suivante (Teyssedre & Boudou, 2010).

$$P = P_{\infty} + P_d \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1.8)$$

Avec τ le temps de relaxation, P_{∞} la polarisation instantanée par rapport à l'échelle de temps mesurée, qui est souvent le résultat des polarisations électronique et ionique, et P_d la contribution différée de la polarisation.

Sous un champ alternatif, ces phénomènes engendrent l'apparition de pertes. En présence d'un mécanisme de relaxation de constante de temps τ qui se comporte suivant le modèle de Debye (Teyssedre & Boudou, 2010) et (Bartnikas & Eichhorn, 1983), les parties réelles et imaginaires de la permittivité sont dépendantes de la pulsation ω du champ ainsi que du temps de relaxation comme suit :

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \\ \varepsilon'' &= (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) + \frac{\omega \cdot \tau}{1 + \omega^2 \cdot \tau^2} \end{aligned} \quad (1.9)$$

Avec ε_s permittivité électrique statique (c'est-à-dire pour $f = 0$) et ε_{∞} la permittivité électrique à fréquence infinie.

Or le temps de relaxation est souvent fonction de la température T sous la forme d'une loi d'Arrhenius :

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{E_a}{k.T}} \quad (1.10)$$

Où E_a est l'énergie d'activation, k est la constante de Boltzmann et τ_0 une constante.

La permittivité à fréquence fixée et le maximum de perte sont donc tous deux dépendants de la température.

Dans les polymères, les différents mouvements moléculaires engendrés par les mécanismes de polarisation produisent des phénomènes de relaxation (Teyssedre & Boudou, 2010). Ces relaxations sont classées par ordre de fréquences d'apparition croissantes à température fixe ou par ordre de températures décroissantes à fréquence fixe, et sont identifiées arbitrairement par les lettres successives de l'alphabet grec (α , β , γ).

La relaxation α correspond généralement à la vibration et la réorientation des chaînes principales des régions cristallines dans les polymères semi-cristallins et aux mouvements des chaînes latérales lors de la transition vitreuse pour les polymères amorphes.

La relaxation β correspond au mouvement des chaînes latérales à la transition vitreuse pour les polymères semi-cristallins et aux mouvements localisés des groupements latéraux pour les polymères amorphes.

La relaxation γ correspond aux mouvements localisés des groupements latéraux des régions amorphes pour les polymères semi-cristallins. L'intensité des pics de relaxations α et γ d'un polymère semi-cristallin est fonction de la fraction volumique des phases amorphes et cristallines consistant le matériau (Bartnikas & Eichhorn, 1983; Teyssedre & Boudou, 2010).

1.2 Propriétés diélectriques d'un condensateur

Le condensateur est un appareil électrique qui stocke des charges électriques en fonction du potentiel appliqué à ses bornes (Huan et al., 2016). Lors de son utilisation dans les réseaux

électriques, il est soumis à un signal alternatif de fréquence f ou de pulsation ω (Beauger, Haussonne, & Niepce, 2007) :

$$\omega = 2.\pi.f \quad (1.11)$$

1.2.1 Capacité électrique

La représentation théorique d'un condensateur soumis à un signal de fréquence inférieure à 1 GHz est un assemblage de deux électrodes métalliques et d'un matériau diélectrique de forme arbitraire comblant le vide entre les deux électrodes. Le matériau diélectrique peut être un film polymère, une céramique, un ensemble mixte de papier imprégné d'une huile ou d'un gaz diélectrique (Huan et al., 2016). La capacité électrique du condensateur est la quantité de charges électriques stockées sur les électrodes du condensateur pour un potentiel électrique appliqué à ses bornes. On définit alors la capacité électrique théorique du condensateur par l'équation suivante :

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (1.12)$$

Où C est la capacité du condensateur, Q la charge électrique induite sur les électrodes et V la tension appliquée entre les électrodes.

Cette définition générale de la capacité ne tient pas compte ni de la géométrie du condensateur ni de l'homogénéité du matériau diélectrique. De plus elle ne fait pas intervenir les propriétés diélectriques du matériau. Tel qu'illustré à la Figure 1.3, la représentation usuelle d'un condensateur est un assemblage de deux électrodes planes d'aire A , parallèles et séparées par un film de matériau diélectrique homogène d'épaisseur d (Beauger et al., 2007).

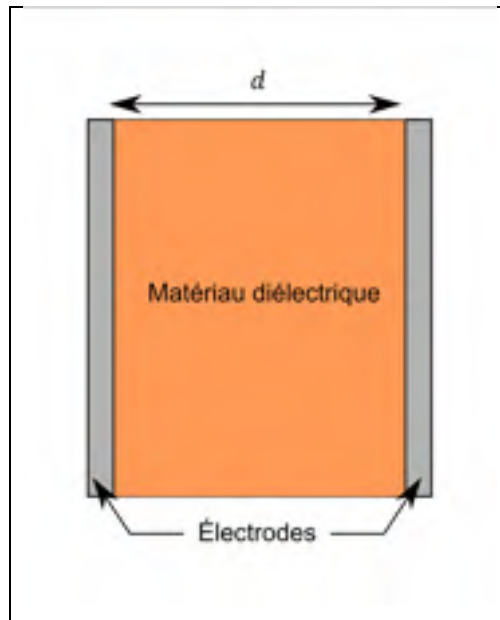


Figure 1.3 Coupe transversale d'un condensateur plat

Dans cette configuration, le matériau diélectrique et les électrodes ont un contact parfait à leur interface, les électrodes sont équidistantes et le matériau diélectrique a un comportement linéaire. Les dimensions latérales des électrodes sont supposées être supérieures d'un ordre de grandeur par rapport à l'épaisseur d du matériau diélectrique (Figure 1.3). Cette hypothèse permet de s'affranchir des effets de bords aux extrémités des électrodes, qui affectent les valeurs de la permittivité et des pertes du matériau diélectrique (Jonscher, 1983).

On obtient alors une nouvelle définition de la capacité :

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d} \quad (1.13)$$

Avec ε la permittivité électrique absolue du matériau diélectrique.

Lorsqu'un condensateur parfait, c'est-à-dire un condensateur avec un matériau diélectrique sans perte, est soumis à une tension alternative (AC) sinusoïdale, le courant et la tension sont en quadrature sans dissipation d'énergie. Dans le cas d'un condensateur réel, c'est à dire avec un diélectrique non parfait, la polarisation ne suit pas la tension instantanément due à l'inertie des dipôles. La relaxation électrique induit une perte d'énergie dans le condensateur, qui se manifeste par un déphasage de $\frac{\pi}{2} - \delta$ (Beauger et al., 2007; Bureau, 2016).

(David, 2010b) montre que lorsque une tension alternative (AC) sinusoïdale de pulsation ω est appliquée aux bornes d'un condensateur réel, on peut exprimer le courant traversant le condensateur $I^*(\omega)$ en fonction de la tension à ses bornes $E^*(\omega)$ à l'aide d'une transformée de Fourier (David, 2010a, 2010b) :

$$I^*(\omega) = \omega \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{\sigma}{\omega \cdot \epsilon_0} + \epsilon_r''(\omega) \right) + i \cdot \epsilon_r'(\omega) \right] \cdot E^*(\omega) \quad (1.14)$$

Avec C_0 la capacité sous vide du condensateur, σ la conductivité du matériau et $\epsilon_r'(\omega)$ la partie réelle de la permittivité représentant l'énergie stockée dans le condensateur.

Des pertes de chaleur suite à un échauffement du matériau diélectrique dû aux mécanismes de relaxation sont représentées par la partie imaginaire de la permittivité $\epsilon_r''(\omega)$: en effet, les charges des dipôles présentent une inertie par rapport à la sollicitation électrique, qui dépendent de la fréquence ; leur mise en mouvement génère donc une perte énergétique. Les pertes dues au courant de fuite, associée à la résistance électrique du matériau, sont représentées par le terme $\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$ (Beauger et al., 2007). Ces pertes par conduction sont autant plus grandes que le matériau contient un nombre important d'impureté ou de traces de catalyseur (Bartnikas & Eichhorn, 1983).

Dans le cas d'un matériau diélectrique parfait, les fuites et les pertes sont nulles. On retrouve alors le comportement d'un condensateur parfait, avec le courant en avance de phase de 90° par rapport à la tension (David, 2010b).

Dans le cas d'un matériau diélectrique non parfait, l'équation précédente peut être ramenée à :

$$I^*(\omega) = i \cdot \omega \cdot C^*(\omega) \cdot E^*(\omega) \quad (1.15)$$

Où l'on note $C^*(\omega)$ la capacité complexe, équivalente à :

$$C^*(\omega) = C'(\omega) - iC''(\omega) = C_0 \cdot (\epsilon_r'(\omega) - i \left(\epsilon_r''(\omega) + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right)) \quad (1.16)$$

Avec $C'(\omega)$ capacité réelle représentant la capacité ordinaire et $C''(\omega)$ capacité imaginaire représentant la perte diélectrique du condensateur (Jonscher, 1983).

1.2.2 Impédance du condensateur

L'amplitude de la tension alternative V aux bornes d'un condensateur de capacité C peut s'exprimer à l'aide de la loi d'Ohm par :

$$V = ZI \quad (1.17)$$

Avec I , l'amplitude du courant alternatif dans le condensateur et Z , l'impédance du condensateur en Ohms. L'impédance est donnée par la formule :

$$Z = \frac{1}{i\omega C} \quad (1.18)$$

1.2.3 Tangente de l'angle de perte

On définit la tangente de l'angle de perte ou le facteur de dissipation diélectrique $\tan\delta(\omega)$ par le quotient de l'énergie dissipée dans le matériau diélectrique sur l'énergie stockée lors du pic de polarisation (Jonscher, 1983).

$$\tan\delta(\omega) = \frac{\varepsilon_r''(\omega) + \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0}}{\varepsilon_r'(\omega)} \quad (1.19)$$

On peut représenter l'angle de perte avec un diagramme de Fresnel, où \vec{E} est le potentiel aux bornes du condensateur, \vec{I}_c le courant purement capacitif et \vec{I}_p le courant de perte d'énergie dans le diélectrique due à la polarisation et à la conduction (Figure 1.4).

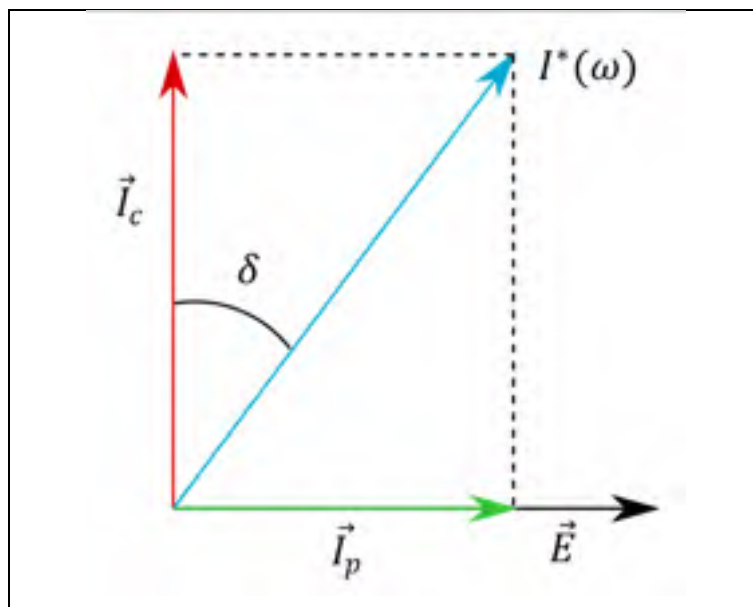


Figure 1.4 Diagramme de Fresnel d'un condensateur avec un matériau diélectrique imparfait

On peut aussi exprimer le facteur de dissipation en fonction de la capacité (David, 2010b) :

$$\tan\delta(\omega) = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (1.20)$$

Le facteur de dissipation ne tient pas compte de la géométrie du condensateur. En théorie, il est plus judicieux d'étudier la permittivité imaginaire $\varepsilon''(\omega)$ et la permittivité réelle $\varepsilon'(\omega)$ séparément plutôt que le facteur $\tan\delta(\omega)$ dû au fait que ce dernier soit un ratio de deux valeurs dépendantes de la fréquence du signal électrique (Jonscher, 1983).

1.3 Mécanisme de rupture diélectrique dans un condensateur :

1.3.1 Rupture diélectrique dans les matériaux diélectriques solides

Les matériaux diélectriques solides occupent les rôles de support mécanique pour les parties actives et de matériaux isolants dans les structures hautes tensions. La rupture dans un diélectrique solide est un phénomène destructif, qui modifie de façon irréversible le matériau (David, 2010c).

Trois mécanismes de rupture diélectriques peuvent avoir lieu dans un matériau diélectrique solide soumis à un champ électrique uniforme : la multiplication par avalanche, le claquage thermique et le claquage électromécanique (Bartnikas & Eichhorn, 1983; Teyssedre & Boudou, 2010).

La multiplication par avalanche a lieu lorsque des électrons accélérés par le champ électrique percutent les particules (atomes ou molécules) du matériau solide. Ces collisions produisent des phénomènes d'ionisation, c'est-à-dire la formation d'un ion et l'émission d'un nouvel électron à partir d'une particule neutre. L'électron émis peut alors être accéléré à son tour et ioniser une autre particule. La multiplication des porteurs de charges dans le matériau diélectrique engendre une avalanche électronique. Ces avalanches électroniques successives

amplifient le courant électrique de faible intensité traversant le matériau, appelé courant de décharge, et conduisent, à terme, à l'endommagement de l'isolant (Karadjian, 2018).

Le claquage thermique prend place lorsque la conductivité thermique du matériau n'est pas suffisante pour compenser localement l'échauffement produit par effet Joule dans le diélectrique. Cet échauffement va alors engendrer une augmentation de la conductivité électrique du matériau, qui à son tour va alimenter l'échauffement par effet Joule. Ce cycle d'emballlement thermique mène alors à la dégradation du matériau diélectrique (Teyssedre & Boudou, 2010). Le claquage thermique peut apparaître à chaud si la conductivité du matériau est importante, ou à basse fréquence si les pertes diélectriques sont élevées (Bureau, 2016).

Enfin, le claquage électromécanique provient d'une pression électrostatique trop élevée appliquée sur les électrodes sous tension. La déformation induite par la pression produit une diminution de la distance interélectrode, donc une diminution de la rigidité diélectrique. Le claquage électromécanique peut mener au claquage si l'effort produit excède la limite à la rupture mécanique du matériau (Bureau, 2016; Teyssedre & Boudou, 2010).

(Teyssedre & Boudou, 2010) avancent qu'il est globalement considéré qu'à basse température, lorsque le polymère est à l'état vitreux ou cristallisé, le processus de rupture par avalanche prévaut.

1.3.2 Rigidité diélectrique et claquage

Lorsque la densité d'énergie électrostatique maximum est atteinte dans le condensateur, on observe un claquage. Le claquage correspond à la formation d'un court-circuit entre les électrodes du condensateur.

La rigidité diélectrique appelée aussi champ disruptif correspond au champ électrique maximum que peut supporter le matériau avant un claquage. Elle traduit l'aptitude d'un isolant à résister au phénomène de claquage (Beauger et al., 2007). La rigidité diélectrique dépend de

nombreux facteurs comme la température, la géométrie, le volume d'isolant ou la présence d'humidité (David, 2010c). Dans un matériau diélectrique d'épaisseur d , le claquage a lieu à la tension de claquage V_{bd} correspondant au champ de claquage admissible par le matériau diélectrique E_{bd} , donné par la relation suivante (Huan et al., 2016) :

$$V_{bd} = E_{bd} \cdot d \quad (1.21)$$

1.3.3 Décharges partielles internes

Les isolants électriques solides contiennent souvent de petites cavités à l'interface avec les électrodes ou à l'intérieur même du matériau diélectrique. Ces vacuoles sont généralement remplies d'un gaz ou d'un liquide, milieux dont la rigidité diélectrique et la permittivité sont inférieures à celles du matériau solide dans lequel les cavités sont incluses. Ainsi, lors d'un fonctionnement nominal du système isolant, ces cavités sont soumises à un champ électrique plus élevé, initiant un claquage dans les vacuoles alors même que la rigidité diélectrique du matériau solide n'a pas été atteinte (Kuffel, Zaengl, & Kuffel, 2000). On parle alors de décharges partielles (DP) internes, car la décharge se produit dans le matériau et n'engendre pas un court-circuit entre deux électrodes (Teyssedre & Boudou, 2010).

Le phénomène de décharge partielle interne dans un matériau diélectrique solide soumis à un champ alternatif peut être modélisé à partir d'un circuit équivalent. La Figure 1.5 a) présente la vue de coupe d'une cavité sphérique de diamètre t dans un matériau diélectrique solide d'épaisseur d . Le matériau solide est positionné entre deux électrodes qui lui imposent une tension alternative V_a . La tension aux bornes de la cavité est notée V_c . La Figure 1.5 b) représente le circuit équivalent correspondant au schéma a).

Les capacités C_c et C_b représentent respectivement la cavité et la portion de diélectrique solide alignée en série avec la cavité, perpendiculairement aux électrodes. La capacité C_a représente la partie restante de matériau diélectrique, non altérée.

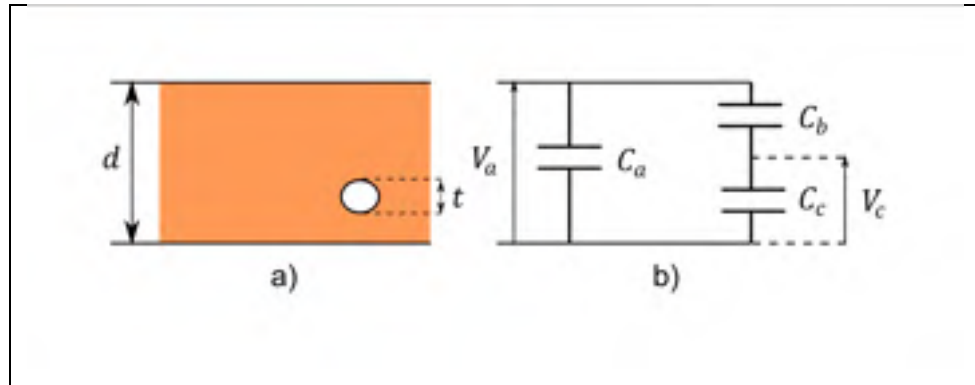


Figure 1.5 Représentation a) et circuit équivalent b) d'une décharge partielle dans une couche de matériau diélectrique solide
Adapté de (Kuffel et al., 2000)

En supposant que le diamètre de la cavité est négligeable par rapport l'épaisseur du matériau diélectrique ($t \ll d$), et que la cavité est remplie de gaz, le champ aux bornes de cette dernière est défini par l'équation suivante :

$$E_c = \frac{\varepsilon \cdot V_a}{d} \quad (1.22)$$

Avec ε la permittivité du matériau diélectrique solide.

La tension aux bornes de la cavité s'exprime quant à elle par l'équation :

$$V_c = \frac{C_b}{C_b + C_c} \cdot V_a \quad (1.23)$$

Lorsque la tension dans la cavité V_c atteint la tension V^+ , tension correspondant au claquage de la cavité, une décharge partielle apparaît et la tension V_c chute à une tension non nulle inférieure la tension de claquage de la cavité. Le potentiel V_a aux bornes du matériau diélectrique solide est alors appelé tension d'apparition des décharges partielles. Les décharges partielles se déroulent pendant un temps très court, de l'ordre des nanosecondes, et s'accompagnent d'une impulsion de courant dans l'échantillon.

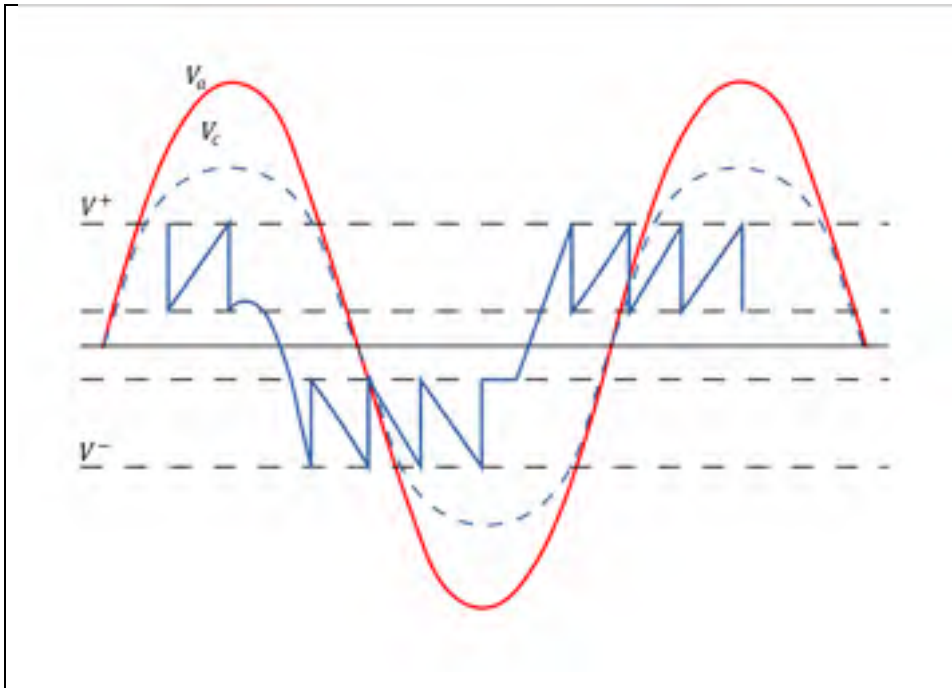


Figure 1.6 Récurrence de décharges partielles dans une vacuole soumise à une tension alternative
Adapté de (Kuffel et al., 2000)

Tant que la tension V_a n'a pas atteint son maximum (phase $\varphi = 90^\circ$), la tension aux bornes de la cavité augmente à nouveau jusqu'à atteindre la tension V^+ et initier une nouvelle décharge (Figure 1.6). On observe aussi le phénomène de décharge pendant l'alternance négative du potentiel, avec une récurrence qui perdure jusqu'à ce que le potentiel ait atteint son maximum V^- (phase $\varphi = 270^\circ$). Lorsque la tension aux bornes de la cavité diminue, le cycle de décharge se maintient jusqu'à ce que le potentiel de la cavité ait atteint un seuil, appelé tension d'extinction des décharges partielles, et dont la valeur est différente du seuil d'apparition des décharges partielles (Karadjian, 2018).

Le claquage du gaz présent dans la cavité engendre un plasma qui érode localement le matériau et dégrade ses propriétés diélectriques. La décomposition des parois du polymère crée des gaz réactifs comme le dioxyde d'azote NO_2 et l'ozone O_3 (Bureau, 2016; Wolter, Johnson, & Tanaka, 1978). Ces gaz participent à l'oxydation locale du matériau et créent un milieu

favorable à l'apparition d'autres décharges partielles, allant jusqu'au claquage de l'isolant solide (Kuffel et al., 2000).

Des hypothèses concernant le type de défaut à l'origine de décharges partielles internes peuvent être faites à partir de l'analyse d'un histogramme de DP. Ces histogrammes présentent sur une seule période du signal de la tension d'essai tous les événements de DP ayant eu lieu pendant les multiples périodes effectuées par la tension au cours du test. Un histogramme de DP est présenté à la Figure 1.7 : l'histogramme permet alors de connaître l'intensité (ordonnée), la position dans la phase (abscisse) et la récurrence des événements de DP survenus pendant l'essai (nuance de couleur différentes en fonction du nombre d'événements). Néanmoins, l'identification formelle du type de décharge et du défaut associé reste difficile à établir tant les types de défauts et les profils de décharges partielles peuvent être différents en fonction des applications (câble HT, condensateurs, machines tournantes, transformateurs). Les analyses font souvent référence à des observations empiriques et font l'objet de nombreuses discussions.

Karadjian (2018) explique dans la revue de littérature de sa thèse que les décharges partielles internes à un matériau sont souvent caractérisées par une avance de phase par rapport au changement de polarité. En effet, dans une cavité, les décharges partielles antérieures ont déposé des charges sur la paroi, précipitant les décharges suivantes. Les décharges partielles avec un profil pseudo-sinusoidal et survenant dans les phases positives et négatives sont représentatives de défauts de forme régulière dans le matériau comme des cavités multiples. Les propos de Karadjian sont appuyés par Nattrass (1988) et complétés en indiquant que la tension d'apparition des décharges est en avance de phase par rapport au pic de tension. La tension d'extinction de ce type de décharges partielles interne est plus élevée que la tension d'apparition.

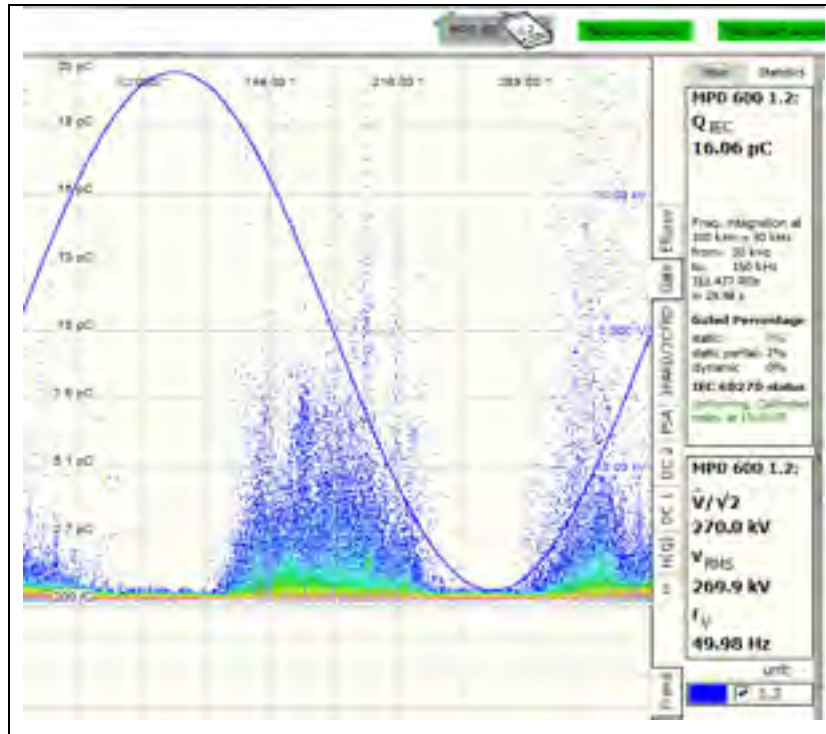


Figure 1.7 Exemple d'histogramme de décharges partielles
Tiré de (Partial Discharge Expert System de Condis, 2019)

Natrass (1988) décrit le patron des décharges générées dans des cavités formées à partir de la délamination entre deux couches d'une isolation multidiélectrique. Les décharges associées à ce type de cavité ont une tension d'apparition en avance de phase par rapport au maximum de tension et sont symétriques par rapport aux polarités. Leur intensité augmente rapidement en fonction du niveau de tension. La tension d'extinction des décharges est inférieure à la tension d'apparition.

1.4 Conception de condensateurs haute tension

Il existe différentes conceptions de condensateurs haute tension : celles-ci varient en fonction du type d'électrode, du mur diélectrique et de la mise en forme appliquée. La bobine est la mise en forme la plus courante (Boggs, Ho, & Jow, 2010).

1.4.1 Condensateur plat multidiélectrique

Les systèmes isolants multidiélectriques sont des systèmes composés de plusieurs couches de matériaux diélectriques différents. Ils sont utilisés dans les applications haute tension, dans lesquelles les isolants fluides ou gazeux ne permettent plus de réaliser une isolation à eux seuls. Le champ électrique appliqué dans une couche étant dépendant de la permittivité du matériau, la configuration multidiélectrique permet de répartir le champ appliqué entre les différents matériaux constituant le mur diélectrique afin de concevoir l'isolation la plus adaptée à l'application. Néanmoins, un écart de permittivité trop important entre les couches de matériaux peut être dangereux pour l'isolation électrique en concentrant le champ sur certaines couches du système isolant. Une construction multidiélectrique solide nécessite que chaque couche du mur diélectrique soit en contact étroit avec les couches l'entourant afin d'éviter la formation vide aux interfaces (Kuffel et al., 2000). Dans la majorité des systèmes isolants haute tension multidiélectrique, le mur isolant est imprégné par un fluide diélectrique afin de limiter la présence de vacuoles.

Le champ électrique dans les couches de matériaux d'un condensateur multidiélectrique plat soumis à un champ homogène peut être calculé analytiquement. Prenons le cas d'un condensateur plat dont le mur diélectrique est constitué de deux matériaux de permittivité respective ε_1 et ε_2 , d'épaisseurs respectives d_1 et d_2 , de champs électriques E_1 et E_2 . Le condensateur est soumis à un champ alternatif uniforme \vec{E} , et on négligera les effets de bords (Figure 1.8).

En supposant que la conductivité des matériaux est nulle, la densité de charges dans chacune des deux couches est la même (Kuffel et al., 2000). Le ratio entre les champs électriques est :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (1.24)$$

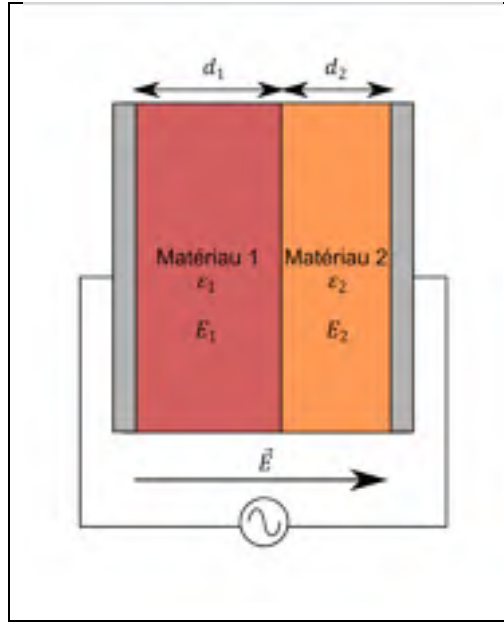


Figure 1.8 Coupe transversale d'un condensateur plat multidiélectrique

On peut exprimer le potentiel V entre les deux électrodes par :

$$V = E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 \quad (1.25)$$

Enfin, le champ électrique dans la couche 1 du mur électrique est :

$$E_1 = \frac{V}{\varepsilon_1 \cdot \left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} \right)} \quad (1.26)$$

Cette formulation peut être généralisée dans le cas d'un condensateur plat à électrodes parallèles contenant n couches de matériaux diélectriques isotropes de permittivités respectives ε_i , d'épaisseurs respectives d_i , de champs électriques E_i , et soumis à un champ uniforme \vec{E} . Le potentiel V entre les deux électrodes et le champ électrique E_i dans la couche i s'expriment alors par :

$$V = \sum_{j=1}^n E_j \cdot d_j \quad (1.27)$$

$$E_i = \frac{\frac{V}{\varepsilon_i}}{\sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\varepsilon_j}}$$

1.4.2 Condensateurs à électrodes laminées

Les condensateurs laminés sont constitués par superposition de ruban de matériau diélectrique et de ruban d'électrodes laminées, le plus souvent en aluminium. L'ensemble est enroulé sous la forme d'une bobine (Boggs et al., 2010; Hantouche, 1996).

Il existe deux configurations pour les condensateurs à électrodes laminées. Dans la première configuration, le ruban d'électrode est une unique section continue. Dans la seconde configuration, le ruban d'électrode est sectionné en plusieurs tronçons flottants (de quelques mètres) de longueurs égales afin de former des condensateurs en série à l'intérieur de la bobine. Cette deuxième configuration, présentée Figure 1.9 est appelée configuration multi section, et chaque sous unité du condensateur reprend une partie de la tension totale à laquelle est soumise la bobine. Les bornes du condensateur sont deux lamelles conductrices connectées au centre et à l'extrémité extérieure de la bobine. Cet arrangement des électrodes laminées à l'intérieur de la bobine permet l'obtention de condensateur haute tension très compacte, mais ce dernier se comporte alors comme une bobine de forte inductance (Boggs et al., 2010).

L'inconvénient principal du condensateur à électrodes laminées est d'être détruit au premier claquage. Les claquages des condensateurs laminés se produisent généralement sur les bords des électrodes, là où les concentrations de champs sont les plus importantes. Différents procédés de découpe d'électrodes ont été expérimentés afin de réduire la concentration de champs électriques sur les bords : le repli des bords de l'électrode, la découpe des bords avec

une lame et la découpe laser. Néanmoins, aucune de ses solutions n'a montré d'avantage significatif au point de s'imposer pour limiter la concentration de champs en périphérie des électrodes (Boggs et al., 2010).

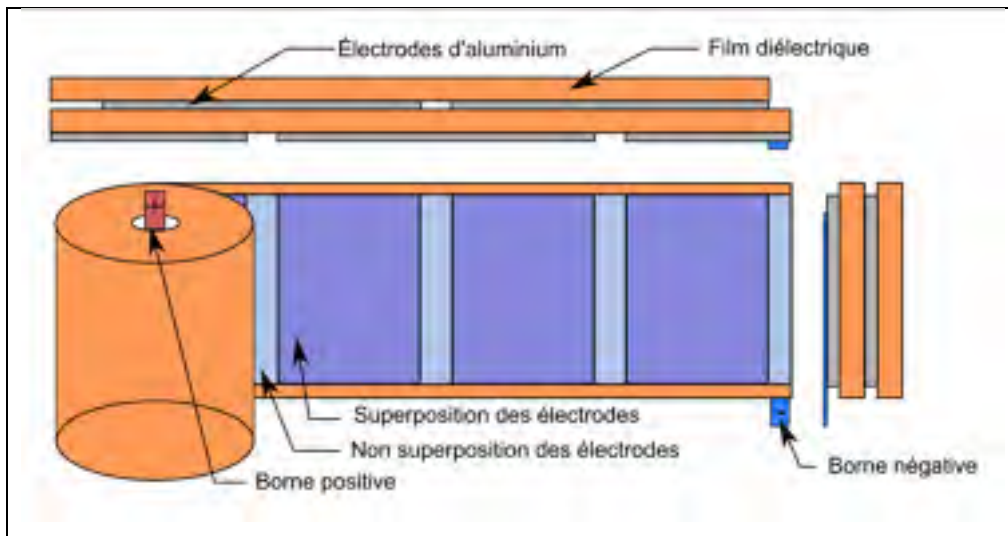


Figure 1.9 Enroulement d'un condensateur multi section
Adapté de (Boggs et al., 2010)

1.4.3 Condensateurs à électrodes métallisées

L'interface entre le matériau diélectrique et l'électrode métallique d'un condensateur est une zone critique. L'épaisseur des électrodes et du film diélectrique peuvent varier de quelques micromètres, laissant des espaces vides à l'interface entre le mur diélectrique et l'électrode (Huan et al., 2016). La technologie à électrodes métallisées s'affranchit de ce défaut en déposant directement une électrode de très faible épaisseur (quelques nanomètres) à la surface du matériau diélectrique, par vaporisation sous vide de métal conducteur. Les matériaux diélectriques les plus utilisés pour la métallisation sont les films polymères ou les films papier de faible épaisseur (Reed & Cichanowskil, 1994). Dans le cas de l'utilisation d'un film diélectrique non polaire, un traitement corona est nécessaire afin d'oxyder la surface du polymère et permettre une bonne adhésion du métal déposé. Les électrodes sont généralement en aluminium, mais d'autres alliages peuvent être utilisés afin de minimiser la corrosion pour

les applications haute tension. Le zinc peut aussi être utilisé, mais il est susceptible de subir des changements chimiques en présence d'humidité, ce qui nécessite un soin particulier lors de sa manipulation (Reed & Cichanowskil, 1994; Yoshida & Nishimatsu, 1986).

Les condensateurs à électrodes métallisées sont majoritairement conçus sous la forme bobinée, en enroulant deux films diélectriques métallisés superposés autour d'un cylindre. Chaque film métallisé dispose d'une bande non métallisée sur l'un de ses côtés et une bande dont l'épaisseur de métallisation est plus grande sur le côté opposé. Les deux films métallisés sont superposés avec un décalage sur la largeur, comme le montre la Figure 1.10. Les côtés des deux films ayant la bande surmétallisée sont tournés vers l'extérieur de la bobine. Cette surépaisseur permet de faciliter la connexion des bornes du condensateur. À l'inverse, les bandes de films non métallisées se situent à l'intérieur de la bobine et permettent d'augmenter la rigidité diélectrique du condensateur en éloignant les deux bornes du condensateur l'une de l'autre.

Dans la configuration bobinée, le contrôle de la tension d'enroulement est primordial afin de maîtriser l'espace entre chaque tour de la bobine et limiter la formation de bulles à l'intérieur du condensateur. Les connexions sont réalisées en projetant du zinc aux deux bornes du condensateur. Le condensateur à électrodes métallisées peut être imprégné ou non imprégné (Reed & Cichanowskil, 1994).

Une autre configuration pour les condensateurs à électrodes métallisées est la configuration monolithique. Les couches de polymère diélectrique et d'électrodes sont déposées successivement par vaporisation. Cette technologie permet d'obtenir des électrodes métallisées sur des murs diélectriques dont l'épaisseur est comprise entre 0,1 μm et 10 μm . La configuration monolithique permet l'obtention de très haute rigidité diélectrique, mais nécessite des conditions de fabrication contrôlée en salle blanche (Reed & Cichanowskil, 1994).

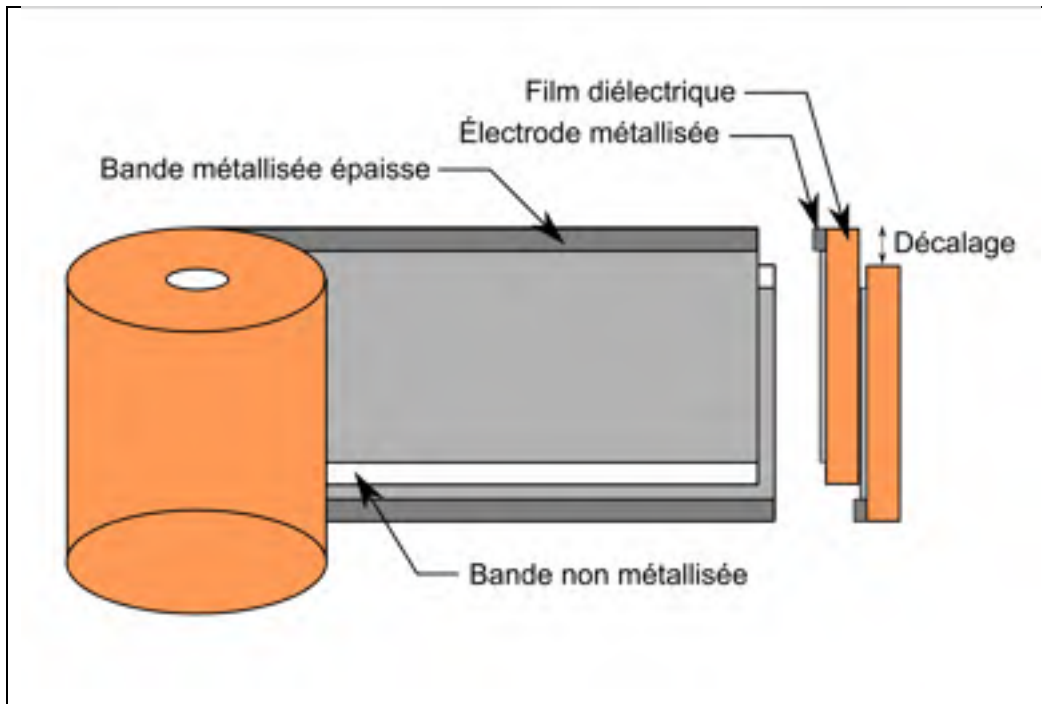


Figure 1.10 Condensateur bobiné à électrodes métallisées
Adapté de (Boggs et al., 2010)

L'avantage principal des condensateurs à électrodes métallisées est leur propriété d'auto cicatrisation qui leur permet d'être résilient à plusieurs claquages consécutifs (Boggs et al., 2010; Reed & Cichanowskil, 1994). Lors d'un claquage, l'électrode métallisée s'évapore localement ce qui permet d'isoler le défaut dans le mur diélectrique, comme le montre la Figure 1.11. Le condensateur est alors encore fonctionnel, mais sa capacité diminue légèrement dû à l'évaporation de la partie d'électrode (Boggs et al., 2010; Reed & Cichanowskil, 1994). La fin de vie du condensateur est définie par un pourcentage de perte de capacité situé entre 2% et 5% (Boggs et al., 2010).

L'aire d'électrode évaporée dépend de la quantité d'énergie libérée lors du claquage. L'auto cicatrisation dépend donc de la résistivité du matériau et de l'épaisseur de l'électrode métallisée : plus l'électrode est mince, plus l'énergie nécessaire pour faire évaporer cette dernière sera faible.

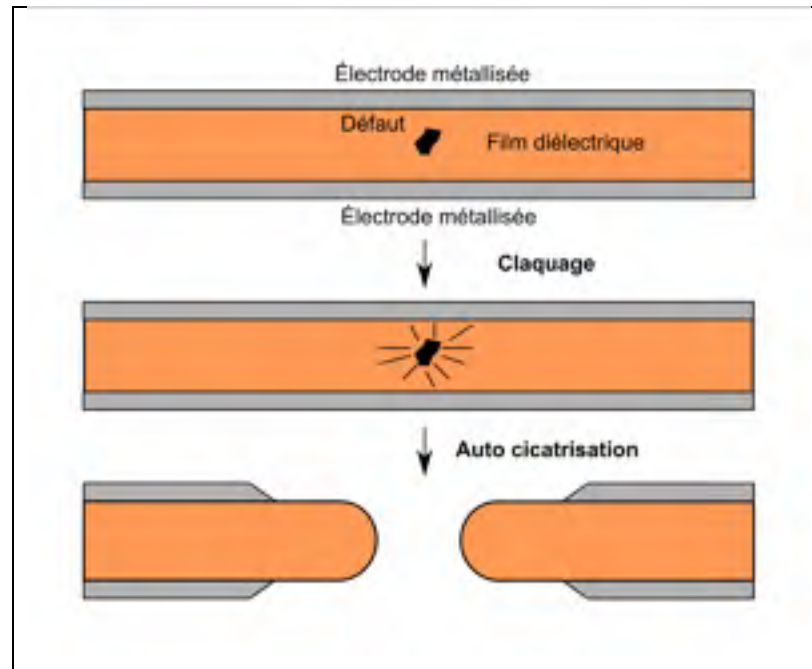


Figure 1.11 Isolement d'un défaut lors du claquage d'un condensateur à électrodes métallisées
Adapté de (Boggs et al., 2010; Reed & Cichanowskil, 1994)

Appliquer une pression importante entre les couches de diélectrique et les électrodes diminue l'énergie nécessaire pour faire évaporer l'électrode. Dans un condensateur bobiné, la pression entre le mur diélectrique et les électrodes diminue graduellement du cœur de la bobine jusqu'à sa surface extérieure. Un traitement thermique peut être appliqué pour uniformiser la pression dans la bobine (Reed & Cichanowskil, 1994).

1.5 Matériaux diélectriques utilisés dans les condensateurs haute tension

1.5.1 Matériaux diélectriques imprégnés par une huile diélectrique

Les huiles diélectriques sont utilisées comme liquide d'imprégnation afin d'éviter que des vacuoles d'air se forment à l'intérieur du mur isolant et provoquent des décharges partielles. Les murs diélectriques imprégnés peuvent être des films polymères ou du papier. Les huiles

diélectriques les plus répandues sont des huiles synthétiques, mais certaines huiles minérales sont aussi utilisées (Reed & Cichanowskil, 1994).

L'imprégnation d'un film de polypropylène avec une huile diélectrique permet une distribution du champ diélectrique plus homogène au sein du film et une augmentation de la rigidité diélectrique d'environ 25% (Schneuwly, Groning, Schlapbach, Irrgang, & Vogt, 1998). L'huile est aussi un bon milieu de transfert de chaleur pour les applications à très haute tension. La présence de quelques pourcents d'humidité dans l'huile engendre un effondrement des propriétés diélectriques. Afin d'obtenir les meilleures caractéristiques diélectriques, l'huile doit être filtrée, séchée et dégazée (Yasufuku, Umemura, Ishioka, & Yasuda, 1977). Les huiles diélectriques ont généralement une faible permittivité relative (≈ 2), mais elles peuvent être mélangée à des huiles ayant de meilleures propriétés diélectriques afin d'augmenter leurs caractéristiques diélectriques (Reed & Cichanowskil, 1994). Historiquement, les huiles diélectriques les plus répandues dans les condensateurs étaient majoritairement composées de polychlorobiphényle (PCB), mais cette molécule a été progressivement retirée au cours des années 1970 pour des raisons environnementales (James & Su, 2008). Le Tableau 1.2 fait état d'huile aujourd'hui utilisées comme imprégnant dans des condensateurs de puissance. Les murs diélectriques dans un condensateur haute tension peuvent être fabriqués par l'association de plusieurs films diélectriques. Des films rugueux sont à privilégier afin de faciliter leur imprégnation par l'huile (Hantouche, 1996; Mouriès, 2007).

Le film le plus utilisé dans les condensateurs imprégnés est le polyéthylène téréphtalate (PET), mais ses pertes diélectriques varient en fonction de la fréquence et la température (Huan et al., 2016). Les films de polypropylène voient leur rigidité diélectrique diminuer significativement avec une augmentation de la température, due à une dissolution dans l'huile diélectrique de la partie amorphe du polymère, créant ainsi des désorientations dans la matrice du matériau diélectrique. Les films de polypropylène peuvent perdre jusqu'à 7% de leur masse lorsqu'ils sont imprégnés avec une huile diélectrique (Reed & Cichanowskil, 1994).

Tableau 1.2 Caractéristiques des huiles utilisées dans les condensateurs de puissance
Adapté de (Hantouche, 1996) page 10 et (Mouriès, 2007) page 5

Caractéristiques	Phényl-xyly-éthane (PXE)	Huile minérale	Mono-di-benzyl-toluène (M/DBT ou Jarylec)
Permittivité relative ϵ_r à 50 Hz à 20 °C	2,7	/	2,6
Permittivité relative ϵ_r à 50 Hz à 60 °C	2,5	/	2,5
Viscosité cinématique à 30 °C (mm ² /s)	6,5	/	6,5
Viscosité cinématique à 75 °C (mm ² /s)	2,3	/	< 2
Rigidité diélectrique (kV/mm)	60	60	70
$\tan(\delta)$ à 1 kHz et 25 °C (10^{-4})	2	10	2

Malgré les pertes diélectriques des films polymères à haute température, la rigidité diélectrique d'un condensateur imprégné est plus importante lorsque l'huile est à haute température. Dans un cas de décharge partielle survenant à la surface d'une électrode à basse température, la décharge progressera plus rapidement à travers le milieu diélectrique, car la plus grande viscosité de l'huile à cette température empêche la dispersion des gaz issus de la décomposition de l'huile par la décharge. À l'inverse, à plus haute température, la plus faible viscosité de l'huile permet une dispersion des gaz plus rapide (Yoshida & Nishimatsu, 1986).

Tableau 1.3 Permittivité relative et perte diélectriques des murs diélectriques imprégnés utilisés dans les condensateurs en électronique de puissance
Adapté de (Mouriès, 2007) page 5

Mur diélectrique	Permittivité relative ϵ_r	$\tan(\delta)$ à 1 kHz et 25 °C (10^{-4})
Papier + huile minérale	≈ 4	/
Mixte papier et polyester + huile	≈ 4	≈ 50
Mixte papier et PP + huile	≈ 3	≈ 15
Polyester + M/DBT	3,2	70
PP rugueux + M/DBT	2,4	~ 2
PP + papier + M/DBT	3,2	10

Des condensateurs à électrodes métallisées imprégnés existent, mais il est nécessaire d'utiliser une huile diélectrique qui ne fasse pas gonfler le matériau diélectrique. Une huile à faible viscosité et faible tension de surface est à privilégier pour imprégner correctement des films de faible rugosité. Néanmoins, la composition chimique de certaine huile peut incapaciter l'auto cicatrisation du condensateur.

La construction d'un mur diélectrique constitué de film polymère et de papier métallisé donne de meilleures rigidités diélectriques que les autres conceptions à électrodes métallisées. Un liquide d'imprégnation à faible viscosité est utilisé afin d'imprégner l'espace entre les électrodes et le film de polypropylène. La décomposition du papier suite au claquage générant peu de graphite, le papier est privilégié comme support des électrodes. En effet, la cellulose est composée d'un grand nombre d'atomes d'oxygène par rapport au nombre d'atomes de carbone et d'hydrogène. Les atomes d'oxygène et d'hydrogène interagissent directement avec les atomes de carbone libérés par l'arc électrique pour former des gaz stables comme le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂) ou le méthane (CH₄). La formation de ses gaz empêche la création d'un pont de graphite entre les deux extrémités d'électrode, qui n'aurait pas permis l'isolement du défaut.

L'emploi d'huiles diélectriques riches en oxygène est aussi conseillé afin d'améliorer la capacité d'auto cicatrisation de ce type de condensateur. Enfin, la contribution du papier dans les caractéristiques diélectriques du mur isolant du condensateur étant bien moins importante que celle du polypropylène, il est préférable d'endommager localement le papier plutôt que le film polymère lors de l'auto cicatrisation (Reed & Cichanowskil, 1994).

1.5.2 Matériaux diélectriques pour conception sèche

L'auto cicatrisation des condensateurs à électrodes métallisées dépend grandement des propriétés du film diélectrique utilisé, car ce dernier doit permettre un claquage sans carbonisation locale du matériau. Les films les plus utilisés sont le PET et le polypropylène orienté biaxial (BOPP). Les polymères ayant une structure pauvre en oxygène comme le polystyrène ou le polycarbonate ne sont pas de bons matériaux diélectriques pour une application à électrodes métallisées. (Reed & Cichanowskil, 1994). Le mur diélectrique des condensateurs multi couches secs est souvent composé d'un film, d'un papier ou d'une association des deux. Le papier fabriqué à base de pâte kraft a une épaisseur comprise entre 8 μm à 25 μm (Boggs et al., 2010). Le polypropylène et plus particulièrement le polypropylène orienté biaxial est le film polymère le plus utilisé dans les applications de condensateur. Le polypropylène est un matériau non polaire qui allie de faibles pertes diélectriques à un champ de claquage élevé (700 kV/mm). Néanmoins, il dispose d'une faible constante diélectrique et ses propriétés se dégradent fortement au-delà de 100 °C (Huan et al., 2016; Qi, Petersson, & Liu, 2014; Reed & Cichanowskil, 1994). Un film polypropylène à haute cristallinité (74,5%) a une rigidité diélectrique quatre fois supérieures à celle d'un film avec une plus faible cristallinité (46,5%). De même, un film avec une orientation biaxiale aura une meilleure tenue au claquage (Gao, Tu, Zhou, & Zhang, 1990). Le PET remplace le polypropylène dans les applications de condensateur de stockage d'énergie, car sa densité d'énergie est 50% supérieure à celle du PP. Son principal désavantage est son facteur de perte élevé qui augmente avec la température et la fréquence, avec un minimum à 50 Hz (Huan et al., 2016; Qi et al., 2014). Le polycarbonate (PC) est de moins en moins utilisé aujourd'hui à cause de faibles

caractéristiques mécaniques. Le PC couvre de grande plage de température que le PP (-50 °C à 125 °C) (Reed & Cichanowskil, 1994). Néanmoins, il tend à être remplacé par le polyphénylène sulfite (PPS) qui est un polymère cristallin plus résistant avec une perte diélectrique moins élevée (Huan et al., 2016; Qi et al., 2014).

Les recherches sur les nouveaux matériaux polymères diélectriques se tournent principalement vers l'amélioration des constantes diélectriques. On notera les recherches sur les polymères polaires comme le polyvinylidène fluoride (PVDF) et ses copolymères, même si les champs de claquage d'un matériau renforcé est moins élevé que celui d'un matériau pur (Tableau 1.4) (Huan et al., 2016).

Tableau 1.4 Propriétés des polymères utilisés comme films dans des condensateurs
Adapté de (Huan et al., 2016) page 239 et (Qi et al., 2014) page 1

Polymères	Température de transition vitreuse T_g (°C)	Température de fusion T_m (°C)	Permittivité relative ϵ'	Perte diélectrique (%) à 25 °C	Rigidité diélectrique E_{bd} (kV/mm)
PP	/	105	2,2	/	640
BOPP	< 25	160	2,25	0,02	720
PET	75-80	255	3,2-3,3	0,35	570
PC	145-150	215-230	2,8-2,9	0,07	450
PPS	120	285	2,8-3	0,03	500
PVDF	/	125	12	/	590

Les copolymères permettent d'augmenter la permittivité d'un polymère initial en lui ajoutant des groupes flexibles OH. Le copolymère propylène-co-p(3-butényl)styrène (PP-BSt) permet l'obtention d'une rigidité diélectrique de 645 kV/mm, une stabilité de ses propriétés en température de 20 °C à 100 °C et une capacité à stocker de l'énergie deux fois supérieure à celle du BOPP (Qi et al., 2014). Des films de polymères sont aussi fabriqués à partir du mélange de deux polymères afin d'améliorer leurs propriétés diélectriques. Le plus souvent, l'un de ses polymères est le polypropylène.

Enfin, les nano composites polymériques sont des polymères dont les propriétés diélectriques ont été augmentées par l'insertion de particules de l'ordre du nanomètre à l'intérieur de sa matrice (Qi et al., 2014). L'utilisation de nanoparticules par rapport à des micros particules permet une répartition plus homogène du champ électrique dans le matériau (Heid, 2015). Les nano composites polymériques disposent d'une meilleure stabilité thermique et d'une plus grande cristallinité, car les nanoparticules gênent le mouvement des chaînes de polymères (Qi et al., 2014; Samuel, Lucas, Fu, Howard, & Lafon-Placette, 2012). Les nanoparticules insérées dans les polymères peuvent être sphériques ou lamellaires avec des couches exfoliées (Reed, 2013). Il a été démontré que l'ajout de nanoparticules de silicate (SiO_2) ou d'alumine (Al_2O_3) crée de petites zones inorganiques à l'intérieur du matériau dans lesquelles vont se concentrer le champ électrique, améliorant ainsi la résilience du matériau aux décharges partielles (Samuel et al., 2012). Afin de maximiser l'amélioration des propriétés diélectriques du matériau, les nano particules doivent être dispersées et distribuées à travers la matrice du polymère. Néanmoins, l'incompatibilité entre la matrice organique du polymère et les nano particules inorganiques peut entraîner l'agrégation de ces dernières, ce qui diminue grandement l'amélioration des propriétés diélectriques permises par l'ajout de nanoparticules (Heid, 2015). Les recherches actuelles se portent principalement sur des traitements de surface pour les nanoparticules, améliorant ainsi la compatibilité entre les nanoparticules et la matrice du polymère (Heid, 2015; Reed, 2013).

1.5.3 Traitement corona pour film polymère

Certains films diélectriques comme le polypropylène sont des matériaux non polaires avec une tension de surface peu élevée présentant des caractéristiques diélectriques intéressantes pour une application diélectrique sèche. Néanmoins, la conception d'un mur diélectrique sec pourrait nécessiter l'utilisation d'une résine polymérique afin d'encapsuler différentes couches de matériau diélectriques comme le polypropylène et réaliser une isolation performante. Dans ce cas, la faible tension de surface du PP entraînera la mauvaise adhésion d'une résine sur le film.

Il est admis qu'un substrat est correctement mouillé si son énergie de surface est supérieure à l'énergie de surface du liquide d'imprégnation. Dans le cas contraire, on observe une mauvaise adhésion entre les deux matériaux. Un traitement corona permet d'augmenter la mouillabilité et l'adhésion d'un liquide sur un substrat traité. Lors du traitement, des groupes ioniques comme les groupes carbonyle (CO) et hydroxyle (OH) sont injectés à la surface du film par des décharges corona en atmosphère contrôlée. Ses groupes polaires tendent à créer facilement des liaisons plus fortes avec le matériau d'imprégnation, augmentant ainsi considérablement la tension de surface du substrat (Kalapat & Amornsakchai, 2012; Vlaeva et al., 2012). Néanmoins, ce traitement de surface (corona) a une durée de vie limitée : la thermodynamique des molécules fait migrer les groupes ioniques polaires de petite taille dans la surface du film, rendant le traitement moins efficace (Kalapat & Amornsakchai, 2012).

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Caractéristiques du condensateur sec haute tension à concevoir

Le condensateur sec haute tension à concevoir est destiné à des applications de disjoncteur haute tension. Ses performances électriques doivent donc égaler les performances de la technologie imprégnée d'huile déjà présente sur le marché.

Le condensateur actuellement fabriqué par Condis consiste en un assemblage en série de 132 enroulements capacitifs identiques maintenus comprimés dans un cadre jouant le rôle de châssis. Cet assemblage est appelé la partie active (PA) du condensateur et est imprégné dans de l'huile diélectrique Jarylec. La PA et l'huile d'imprégnation sont contenues dans une enveloppe externe cylindrique en fibre de verre. Le condensateur dispose aussi d'un dispositif mécanique de soufflet permettant d'amortir les variations de volume de l'huile suite à un gradient de température. Le condensateur imprégné d'huile utilisé pour cette application et fabriqué par Condis a une capacité de 0,6 nF et fonctionne à une tension nominale de 180 kV. Les caractéristiques et les dimensions du condensateur haute tension imprégné sont présentées dans le Tableau 2.1 et le Tableau 2.2.

Tableau 2.1 Dimensions du condensateur imprégné d'huile diélectrique

Nombre de sous unités	132
Longueur de la partie active (mm)	446
Longueur totale du condensateur (PA + Soufflet) (mm)	485

Tableau 2.2 Caractéristiques électriques du condensateur imprégné d'huile diélectrique

Capacité totale (nF)	0,7
Tension AC nominale V_{nominale} (kV)	180
Tension AC test V_{test} (kV)	460

2.1.1 Composition d'une partie active de condensateur haute tension imprégnée d'huile diélectrique

La PA d'un condensateur haute tension imprégné d'huile diélectrique est formée de plusieurs condensateurs identiques connectés en série et reprenant chacun une fraction de la tension totale. Les connexions en séries sont réalisées par soudage à froid de deux électrodes d'aluminium et de leur mur diélectrique par moletage et sont identiques pour toutes les PA. La Figure 2.1 montre une PA de condensateur haute tension de 180 kV (au deuxième plan) et une PA d'un prototype à fabriquer de 40 kV (au premier plan).



Figure 2.1 Photo de parties actives de condensateur haute tension

Ces condensateurs sont sous la forme de bobines obtenues après enroulement puis compression d'un condensateur plat constitué par empilement de deux électrodes d'aluminium et de deux couches de matériau diélectriques (Figure 2.2).



Figure 2.2 Photo d'une bobine prélevée dans une partie active

La Figure 2.3 présente comme une bobine est obtenue à partir d'un condensateur plat.

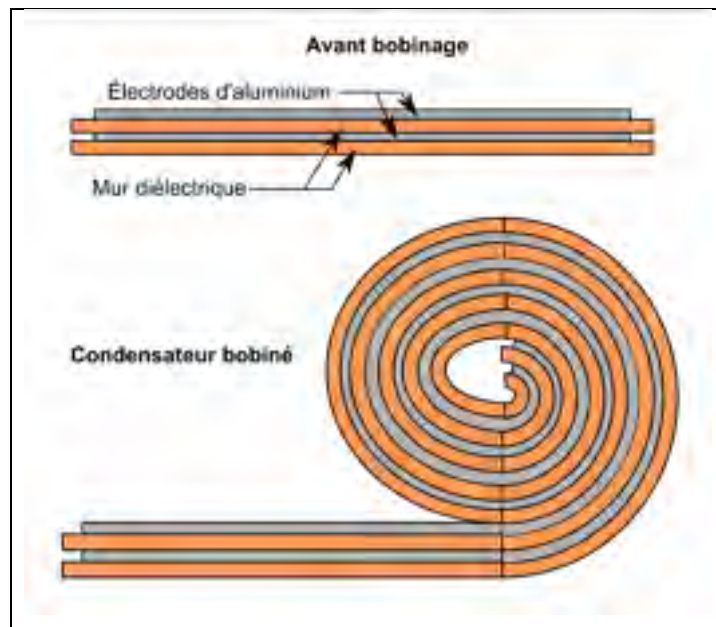


Figure 2.3 Obtention d'un condensateur bobiné à partir d'un condensateur plat

Les électrodes ont une épaisseur de $5\ \mu\text{m}$. Le mur diélectrique du condensateur imprégné d'huile à adapter avec une technologie sèche est un multidiélectrique composé de deux films

de polypropylène rugueux (PPR) de 12,7 μm d'épaisseur, séparés par une couche de papier de 10 μm . Cette composition de mur diélectrique est appelée « diélectrique mixte ». Une représentation du mur à diélectrique mixte en vue de coupe est montrée à la Figure 2.4. L'utilisation du papier imprégné dans l'isolation permet de contrebalancer la dégradation des propriétés diélectriques du PPR à haute température de telle sorte que les propriétés diélectriques d'une isolation composées de papier imprégné et de PPR sont stables au-delà de 80 °C.

Deux autres compositions de mur multidiélectriques sont utilisées dans les condensateurs imprégnés : la composition dite « tout papier », formée de 4 couches de papier imprégné de 18 μm et la composition dite « tout film » formée de 3 couches de PPR de 12,7 μm . Ces deux compositions, ainsi que la composition à diélectrique mixte ont été utilisées lors de la fabrication de condensateur par procédé VPI au CHAPITRE 4.

Le mur diélectrique a toujours une largeur plus importante que le ruban d'électrode afin que les deux électrodes ne puissent pas être en court-circuit à leurs extrémités. Dans une bobine à diélectrique mixte, les électrodes ont une largeur de 45 mm, la couche de papier à une largeur de 50 mm et les films PPR une largeur de 55 mm. Dans le cas des bobines tout film et tout papier, les électrodes ont une largeur de 45 mm et les murs diélectriques une largeur de 55 mm. Néanmoins, la largeur du ruban d'électrode peut varier pour augmenter ou diminuer la capacité du condensateur.

La Figure 2.4 présente deux configurations d'électrodes pouvant être utilisées pour faire varier la capacité d'une bobine. Le condensateur imprégné d'huile a une configuration d'électrodes alignées, dans laquelle les deux électrodes d'aluminium sont placées l'une en face de l'autre afin de maximiser la surface active. Dans cette configuration, les bords des rubans d'électrodes sont alignés sur toute la longueur d'enroulement. Une autre configuration, dite décalée, utilise des électrodes de 30 mm de large décalées l'une par rapport à l'autre dans l'enroulement.

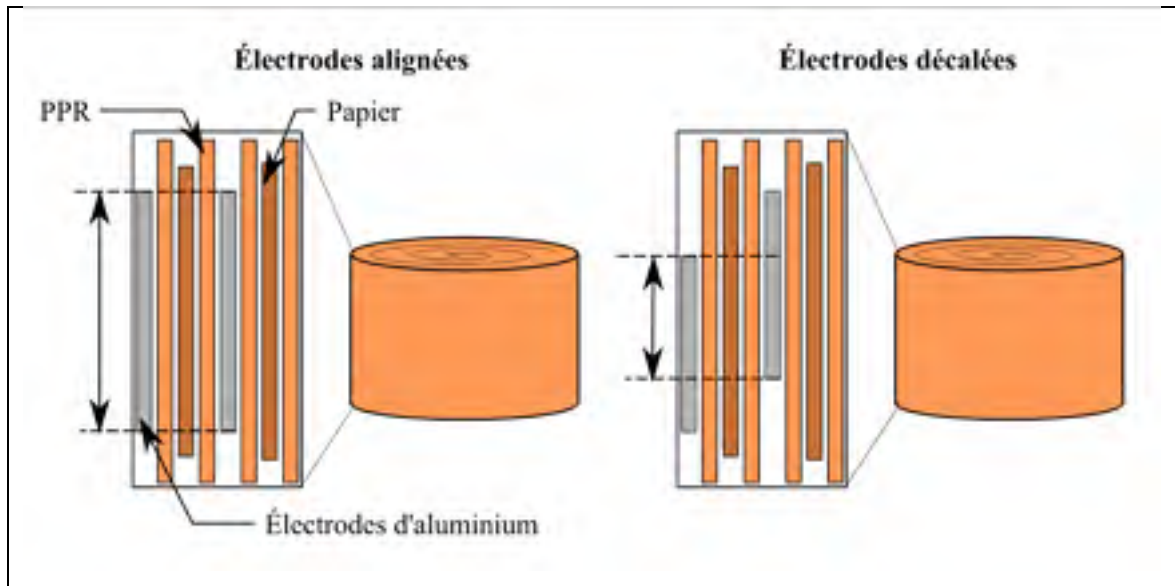


Figure 2.4 Configuration des électrodes alignées et décalées pour une bobine diélectrique mixte

Les bobines constituant la PA sont maintenues comprimées dans une structure en presspahn ou en PCB (panneaux de résine époxy à renfort en fibre de verre) à une pression de $1,5 \text{ kg/cm}^2$ afin d'assurer un contact étroit entre les différentes couches des bobines et ainsi maximiser leur capacité.

2.1.2 Caractéristique des prototypes à concevoir

Pour des raisons d'échelle, le prototype à fabriquer comme preuve de concept a été conçu pour fonctionner à moins haute tension que le condensateur final souhaité par l'industriel.

Ces caractéristiques électriques sont définies à partir des performances d'un condensateur haute tension imprégné d'huile synthétique (Tableau 2.3). La tension nominale est la tension d'opération du condensateur et la tension de test correspond à la tension qu'il doit pouvoir atteindre sans claquer.

Tableau 2.3 Caractéristiques électriques attendues pour un prototype sec

Capacité (nF)	≈ 10
Tension AC nominale $V_{nominale}$ (kV)	15
Tension AC test V_{test} (kV)	40
Fréquence d'opération (Hz)	60
$\tan(\delta)$	$< 20 \times 10^{-4}$
Décharges partielles (pC) à $V_{nominale}$ pendant 60 s	< 5
Rigidité diélectrique équivalente de l'isolant (kV/mm)	> 112

Afin de diminuer les temps de fabrication et les quantités de matériaux utilisées, les performances des technologies sèches sont comparées aux performances d'un enroulement capacitif imprégné d'huile. Les caractéristiques électriques attendues lors des essais sur des bobines sont déterminées à partir des caractéristiques finales attendues pour le prototype. La capacité équivalente C_{eq} d'un prototype formé par l'association en série de n condensateurs bobinés de capacités identiques C est exprimée par :

$$C_{eq} = \frac{C}{n} \quad (2.1)$$

Dans une association en série de sous unités, chaque condensateur reprend une partie de la tension totale à laquelle est soumis le prototype. Dans le cas d'un prototype soumis à une tension $V_{nominale}$, la tension aux bornes d'une sous unité V est donnée par :

$$V = \frac{V_{nominale}}{n} \quad (2.2)$$

2.2 Méthode de caractérisation des propriétés des condensateurs

Cette section présente les essais, les matériels et les méthodes utilisés pour évaluer les performances des technologies de condensateur sec haute tension étudiées.

2.2.1 Mesure préliminaire de la capacité et de la résistance

La résistance et la capacité du condensateur sont mesurées après sa fabrication à l'aide d'un multimètre digital Tektronix DMM914 afin de s'assurer que les électrodes ne sont pas en court-circuit.

2.2.2 Mesure de la température de transition vitreuse par calorimétrie différentielle à balayage

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC - Differential Scanning Calorimetry) est utilisée afin d'identifier la température de transition vitreuse T_g des résines diélectriques étudiées. Elle mesure la différence des échanges de chaleur entre un échantillon et une référence soumis tous les deux à un même cycle de température.

L'appareil utilisé est l'analyseur thermique DSC PerkinElmer Pyris 1 de la compagnie PerkinElmer Instruments. Les essais sont réalisés en suivant la méthode de la norme standard internationale de l'American Society for Testing and Material (ASTM) E1356. La masse de l'échantillon à analyser est comprise entre 5 mg et 15 mg. Il est ensuite placé dans une capsule en aluminium qui lui sert de support dans l'analyseur. Une capsule en aluminium identique sert de référence. Les essais sont conduits sous azote en suivant deux cycles : le premier cycle, identique au cycle de mesure, est appliqué afin d'effacer l'historique thermique de l'échantillon de polymère testé.

Les deux cycles sont réalisés de la manière suivante : T_c est la température de polymérisation de la résine majorée de 20 °C.

- Chauffage à 10 °C/min de 0 °C jusqu'à T_c .
- Isotherme de 1 min à T_c .
- Refroidissement à 20 °C/min de T_c jusqu'à 0 °C.
- Isotherme de 1 min à 0 °C.
- Chauffage à 10 °C/min de 0 °C à T_c .
- Isotherme de 1 min à T_c .

2.2.3 Mesure des propriétés diélectriques par spectroscopie

La capacité et le facteur de dissipation des condensateurs sont mesurés dans le domaine des fréquences par spectroscopie. L'appareil utilisé est un analyseur de réponse fréquentielle Alpha-N de Novocontrol Technologies ayant une plage de fonctionnement en fréquence de 30×10^6 Hz à 10^{-6} Hz. La calibration du matériel et l'acquisition des données sont réalisés avec le logiciel Novocontrol WinDETA. L'échantillon est soumis à une tension alternative de 1 V et de fréquence variable. Les propriétés diélectriques du matériau sont mesurées pour 46 valeurs de fréquence différente. Ces valeurs sont uniformément réparties sur l'échelle logarithmique d'un intervalle de fréquence de 3×10^5 Hz à 0,1 Hz. Une mesure additionnelle est parfois effectuée à la fréquence de 60 Hz.

Lors de la caractérisation des propriétés diélectriques des résines d'imprégnation en fonction de la température, une cellule porte échantillon BDS 1200 Novocontrol et un système de contrôle de température sont utilisés en supplément de l'analyseur. Des plaques minces de résines diélectriques sont fabriquées à partir d'un moule. Un échantillon de forme circulaire, prélevé sur une plaque, est placé entre deux électrodes de diamètres 30 mm ou 40 mm. Le diamètre de l'échantillon doit être légèrement supérieur à celui des électrodes afin de limiter les effets de bord au cours de la mesure. Lors de la mesure, l'échantillon est soumis à une tension alternative de 1 V, et un balayage en fréquence est effectué pour différentes valeurs de températures. Les fréquences de mesures sont les mêmes que celles appliquées lors de la spectroscopie des condensateurs. Pour les mesures effectuées sur la plage de fréquence de

3×10^5 Hz à 1 Hz, seulement 39 mesures sont prises. Les températures auxquelles sont effectuées la mesure sont réparties entre 30 °C et la température de cuisson de la résine, avec un intervalle de 5 °C.

2.2.4 Mesures de décharges partielles

Une mesure de décharges partielles permet d'évaluer la charge et la récurrence des décharges partielles dans les condensateurs fabriqués. Lorsqu'une décharge partielle survient dans l'objet d'essai, elle génère une impulsion de courant détectée par le système de mesure. En intégrant ce signal sur un temps fixé, on obtient la valeur de la charge apparente Q_{IEC} , explicitée par la norme internationale de mesure de décharges partielles IEC 60270. La charge apparente est la charge qui, si elle est introduite sur un temps très court dans le système de mesure à la place de l'objet d'essai, génère le même courant de décharge. L'amplitude d'une décharge partielle est donc caractérisée par la valeur de charge qui lui est associée.

2.2.4.1 Montage de mesure des décharges partielles

Les décharges partielles (DP) sont mesurées à l'aide d'un système d'acquisition de décharges partielles MDP 600 de OMICRON mtronix technology. Le système, présenté à la Figure 2.5, est constitué des éléments suivants :

- Un dispositif d'étalonnage CAL 542 (version B) permettant d'étalonner la charge. Il est utilisé sans haute tension et est ensuite retiré au cours de la mesure. Branché en parallèle de l'objet de test, le dispositif génère des impulsions de 50 pC et de temps de montée inférieur à 4 ns, à une fréquence de répétition de 300 Hz.
- Un condensateur de couplage C_k de faible inductance et de capacité 1 nF.
- Un quadripôle (mesure d'impédance) CPL 542 permettant de convertir le courant d'entrée correspondant aux décharges partielles en une tension de sortie qui sera transmise à l'unité d'acquisition.
- Une unité d'acquisition MDP 600.

- Un système de transmission en fibre optique et un convertisseur optique/numérique MCU 502 afin d'isoler la zone haute tension de test électrique de la zone sécurisée où les données sont analysées.

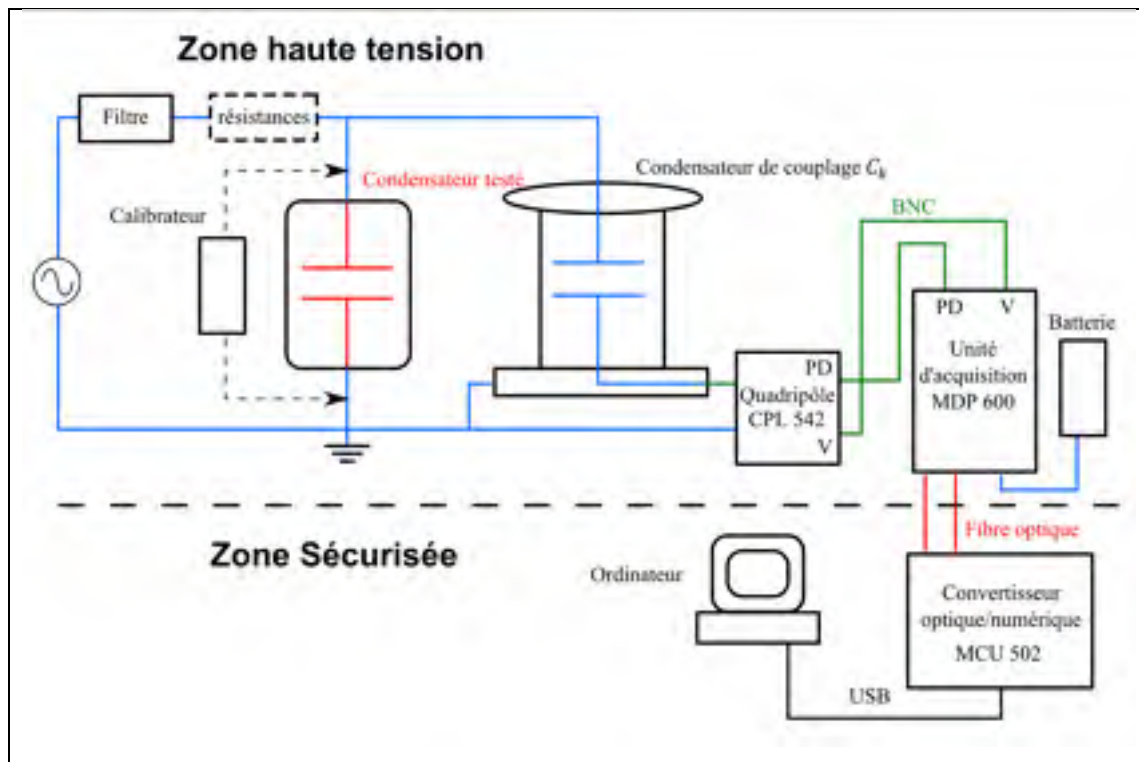


Figure 2.5 Système de mesure de décharges partielles

Le condensateur est soumis à une tension sinusoïdale générée par une source haute tension Phenix Type 600CE 50 kV/165 mA/60 Hz de Phenix Technologies. Le seuil minimum de tension de la source est de 2,5 kV. Lors de la mesure des décharges partielles d'une sous unités, la tension de test à appliquer est généralement inférieure au seuil de tension minimum de la source. Dans ce cas, un banc de 5 résistances de 10 k Ω (équivalent à une résistance de 50 k Ω) est placé en série avec le condensateur. Ce pont diviseur de tension permet à la source de fonctionner au-dessus de son seuil de tension minimum, tout en imposant un potentiel aux bornes du condensateur inférieur à cette limite.

2.2.4.2 Protocole de mesure des décharges partielles

Les mesures sont effectuées en respectant la norme internationale de mesure de décharges partielles IEC 60270. Pour chaque mesure sur un condensateur, le système de mesure est étalonné. Le bruit de fond, correspondant aux décharges de faible grandeur détectées par le système, mais dont l'origine n'est pas l'objet d'essai, est mesuré avec la source allumée, sans potentiel appliqué aux bornes du condensateur.

Le condensateur est ensuite soumis progressivement à sa tension de test, avec une montée en tension de 333 V/s. L'intégration est réalisée dans le domaine fréquentiel afin de ne prendre en compte que certaines composantes de fréquence. Les décharges partielles sont filtrées sur une plage de fréquence large, de fréquence centrale 300 kHz et de bande passante 300 kHz (intervalle de fréquence autour de la fréquence centrale).

La mesure est réalisée pendant 60 secondes, avec une période de référence t_{Ref} de 10 secondes. La période de référence permet un traitement statistique de la mesure en identifiant :

- Le pic de décharge Q_{Peak} , décharge la plus élevée sur la période de référence, indépendamment de la polarité.
- La charge moyenne Q_{Avg} , valeur moyenne des décharges sur la période de référence, indépendamment de la polarité.
- Le taux de répétition d'impulsion moyen n sur la période de référence
- Le courant de décharge moyen I_{Dis} sur la période de référence.
- La puissance de décharge moyenne P_{Dis} sur la période de référence.
- Le taux quadratique D sur la période de référence.

L'analyse est effectuée à partir de l'histogramme de décharges partielles, qui condense sur une seule période tous les événements de décharge partielle mesurés au cours des multiples périodes effectuées par la tension pendant l'acquisition. Il permet de présenter l'amplitude et la position des décharges partielles par rapport à la phase de la tension appliquée aux bornes du condensateur testé. Les nuances de couleur utilisées permettent de quantifier le nombre de

décharges partielles par seconde, allant du bleu au rouge par ordre croissant d'occurrence de décharges. L'histogramme de décharge partielle permet d'aider à identifier le type de défaut correspondant aux décharges partielles observées (localisation dans la phase, intensité).

2.2.5 Essai de claquage diélectrique

La rigidité diélectrique des matériaux diélectriques et des condensateurs est caractérisée à partir d'essais de claquage afin de quantifier leur tenue en tension.

2.2.5.1 Mesure de la rigidité diélectrique d'un matériau solide dans un bain d'huile

La machine utilisée pour les mesures de rigidité diélectrique est le testeur d'huile DTA 100 de BAUR Prüf-und Messtechnik GmbH pouvant appliquer une tension alternative maximum de 50 kV. L'échantillon testé est positionné dans un bac d'essai en verre, entre deux électrodes hémisphériques de diamètre 12,7 mm, comme illustré Figure 2.6. Le bac d'essai est rempli d'huile diélectrique de manière à ce que l'échantillon et les électrodes soient immergés. L'huile diélectrique utilisée est l'huile minérale isolante NYNAS de rigidité diélectrique 56 kV/mm. Le temps de dégazage de l'huile de diélectrique pour chacun des essais est d'au moins une heure à température et à pression ambiantes.

Les échantillons testés sont préparés sous la forme de plaques ou de films minces. Les mesures sont réalisées à température et à pression ambiantes. Les essais ont été réalisés suivant la méthode A « *Short Test* » de la norme standard internationale de l'American Society for Testing and Material (ASTM) D149. L'échantillon testé est soumis à une tension alternative de fréquence 60 Hz jusqu'à son claquage. Le taux de montée en tension est fixé à 0,5 kV/s à partir d'une tension nulle.

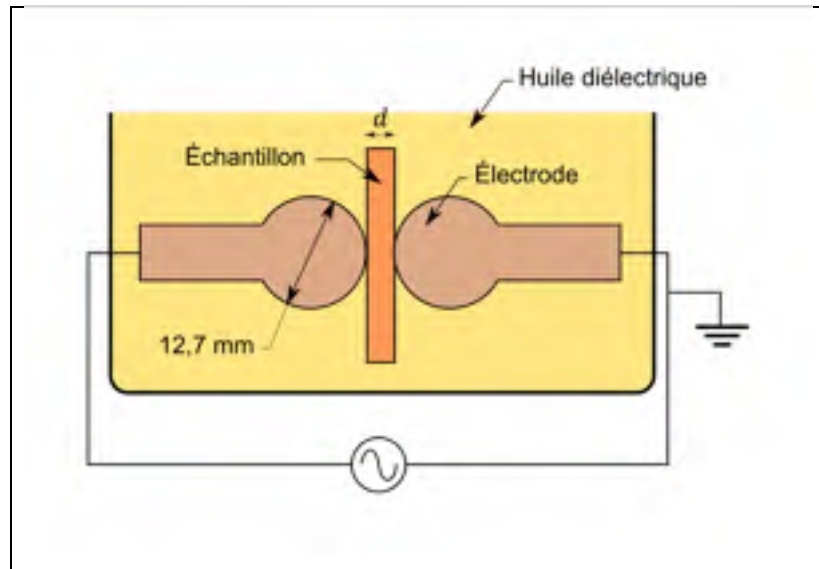


Figure 2.6 Montage de la mesure de rigidité diélectrique

On répète 20 mesures ou plus dans les mêmes conditions pour chaque échantillon. Les mesures sont réalisées à une distance d'au moins 10 mm d'une mesure précédente afin d'éviter le contournement du matériau et rendre ainsi les mesures indépendantes. Le traitement des mesures de claquage a été réalisé selon la norme standard 930 de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (voir l'équation 2.3).

$$E_{bd} = \frac{V_{bd}}{d} \quad (2.3)$$

Où E_{bd} (kV/mm) est la rigidité diélectrique, V_{bd} (kV) la tension de claquage et d l'épaisseur de l'échantillon (mm).

Le traitement des données est effectué suivant une loi de Weibull à deux paramètres α et β . La loi cumulative pour une distribution de Weibull à deux paramètres est donnée à l'équation suivante :

$$P(E) = 1 - e^{\{-\frac{Ebd}{\alpha}\}^\beta} \quad (2.4)$$

Avec α , le facteur d'échelle traduisant la rigidité diélectrique pour $F(\alpha) = 0,632$ et β facteur de forme traduisant la dispersion des mesures. Plus β est élevé, plus la plage de dispersion de la rigidité diélectrique est faible.

Au n points de mesure triés par ordre croissant de champs de claquage E_i , est associé un indice $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$. La probabilité cumulative de rupture $P(i, n)$ associée à la valeur E_i est alors approximée par l'équation suivante :

$$P(i, n) \cong \frac{i - 0,44}{n + 0,25} \quad (2.5)$$

À partir de cette approximation, les facteurs α et β , ainsi que les intervalles de confiances à 90% sont déterminés par régression linéaire, comme l'exige la norme pour des populations supérieures ou égales à 20 échantillons. Si le modèle à deux paramètres est adéquat pour présenter les résultats, ces derniers doivent pouvoir être approximés par une ligne droite dans un diagramme de Weibull. La pertinence du modèle peut être vérifiée visuellement en regardant l'écart systématique entre les valeurs et la droite dans le diagramme, ou en examinant la valeur du coefficient de corrélation, qui témoigne de l'étroitesse de la dispersion des données autour de la droite d'approximation. Afin de s'assurer que la distribution de Weibull est bien la bonne distribution, la norme indique que l'approximation par régression linéaire doit avoir un coefficient de corrélation supérieur à 0,94 pour 20 mesures.

2.2.5.2 Essai de claquage de condensateur plat

Un générateur de fonction BK Precision 400 7B 7MHz DDS génère un signal sinusoïdal de 60 Hz, amplifié par un amplificateur HS TREK modèle 10/10B de gain 1000X. Le signal de tension est visualisé sur un oscilloscope Tektronix TDS 2012 B (100 MHz, 1Gs/s). L'amplificateur alimente un circuit formé d'une résistance de 991 k Ω en série avec le

condensateur testé. Le montage de l'essai est présenté à la Figure 2.7. Les condensateurs sont testés jusqu'au claquage avec une rampe de 0 V à 10 V commandée manuellement depuis le générateur de fonction. Le taux de montée de la source est de 0,1 V/s soit 100 V aux bornes du condensateur. La valeur efficace de la tension (RMS) est relevée sur l'oscilloscope. Le claquage est détecté en mesurant le courant à la sortie analogique de l'amplificateur avec un multimètre digital. Lorsque le claquage du condensateur a lieu, le court-circuit entraîne une chute d'impédance dans le montage. On observe alors une brusque augmentation du courant pour compenser cette chute d'impédance à tension imposée. La sortie analogique de l'amplificateur envoie une tension alternative dont l'amplitude est corrélée au courant dans le circuit à raison de 1 mV pour 4 mA de courant. La valeur de claquage est relevée comme le dernier incrément de tension n'ayant pas entraîné le claquage du condensateur.

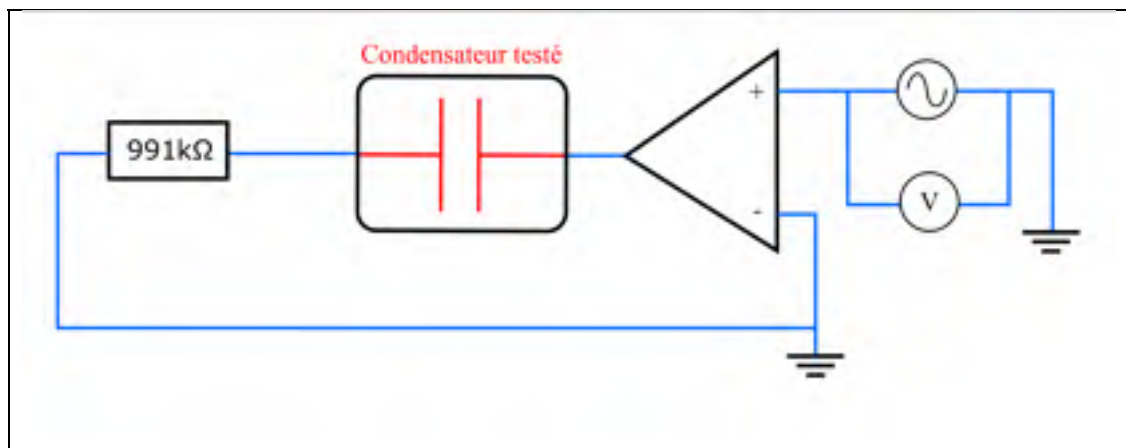


Figure 2.7 Schéma du montage de l'essai de claquage des condensateurs plats

2.2.5.3 Essai de claquage de condensateur VPI

L'essai de claquage est réalisé sur le même montage que celui ayant servi à la mesure des décharges partielles (section 2.2.4.1). Dans le cas du claquage d'enroulement capacitif seul à une tension inférieure à 15 kV, le système de mesures de décharges partielles peut être conservé pour suivre l'évolution des décharges partielles. Lors du claquage d'un prototype à une tension supérieure à 15 kV, le condensateur de couplage et le système de mesure de décharge partielle

sont débranchés. Les condensateurs sont soumis à une rampe de tension alternative générée par la source haute tension Phenix Type 600CE 50 kV/165 mA/60 Hz. La montée en tension est effectuée à 333 V/s. Lors du claquage d'un condensateur, on observe un saut de tension dans la source. La tension de claquage est alors la valeur de la source précédant le pic de tension. Il est possible que la source atteigne sa limite de courant au cours de l'essai. Dans ce cas, le condensateur n'est pas claqué. Après l'essai, la résistance du condensateur est mesurée à l'aide d'un multimètre afin de s'assurer que le claquage a bien eu lieu.

2.3 Présentation du procédé de fabrication VPI

Le procédé VPI est un procédé industriel principalement utilisé pour l'imprégnation de bobines de machines tournantes. Le montage du procédé VPI utilisé pour ce projet est constitué d'un réservoir de résine et d'une étuve dans laquelle est placé le condensateur à imprégner. Le réservoir et l'étuve sont reliés par un tube de transfert contrôlé par une vanne. Les pressions du réservoir de résine et de l'étuve peuvent être contrôlées indépendamment. Le procédé VPI est divisé en 4 étapes présentées à la Figure 2.8.

La première étape est le séchage sous vide du condensateur. Le séchage permet d'éviter que les propriétés diélectriques du condensateur ne soient dégradées par la présence d'humidité. Le papier étant hygroscopique, l'opération de séchage est d'autant plus importante lorsque le mur diélectrique du condensateur en contient. En parallèle, les gaz en suspension et en solution dans la résine sont extraits lors du dégazage sous vide. Le dégazage peut être réalisé à chaud pour faciliter l'extraction de l'humidité.

La deuxième étape du procédé est le transfert de la résine. Le réservoir de résine est pressurisé légèrement alors que l'étuve est maintenue sous vide : à l'ouverture de la vanne de transfert, la différence de pression fait transvaser la résine du réservoir vers le moule du condensateur. Le transfert est arrêté après que le condensateur soit entièrement immergé.

La troisième étape est l'imprégnation du mur diélectrique du condensateur par la résine. L'imprégnation est effectuée sous vide, à une température inférieure à la température de polymérisation de la résine afin de laisser le temps à la résine de mouiller le mur diélectrique.

Lors de la dernière étape, le condensateur est polymérisé dans un autoclave. La pression complète l'imprégnation du condensateur et diminue la taille des vacuoles présentes à l'intérieur du mur diélectrique.

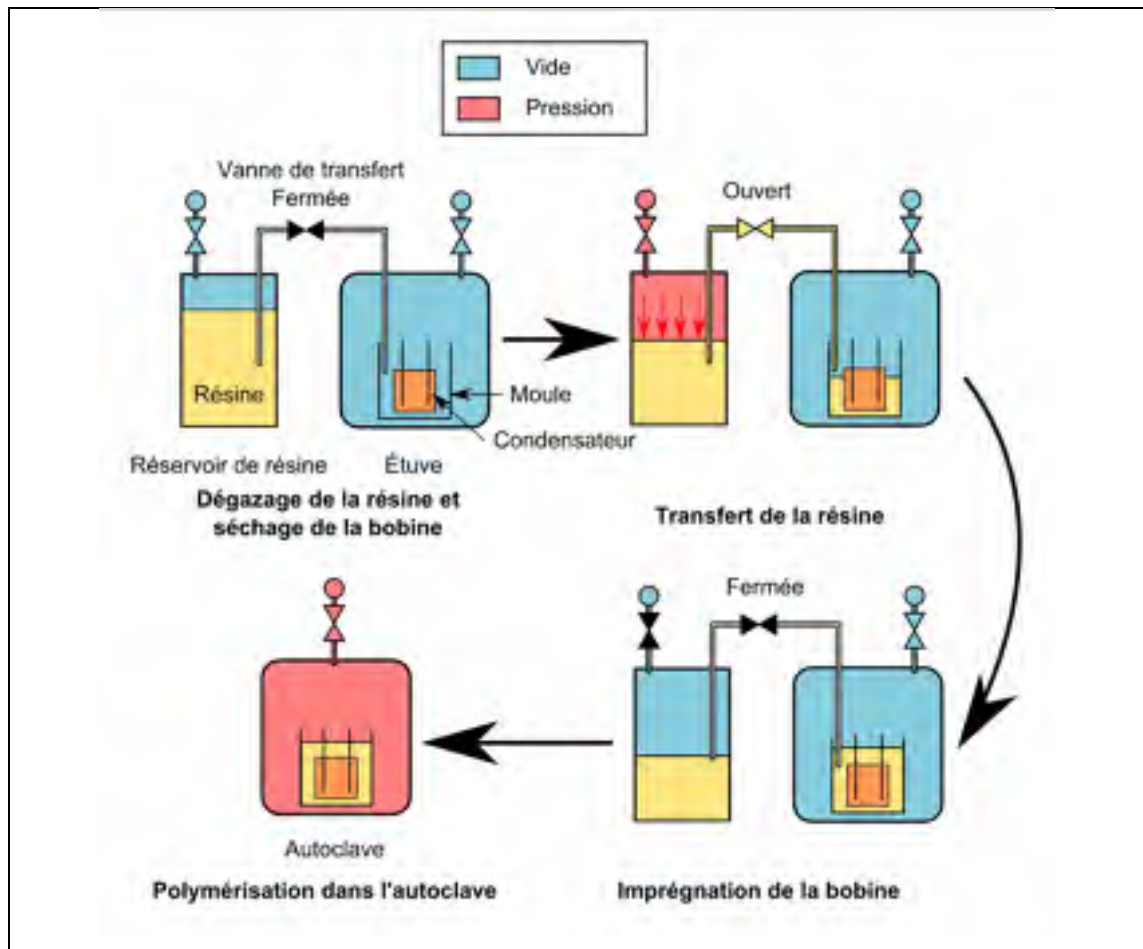


Figure 2.8 Étapes successives de la fabrication d'un condensateur sec par procédé VPI

CHAPITRE 3

CONDENSATEUR MONOLITHIQUE LAMINÉ

3.1 Introduction

Deux technologies de condensateur sec ont été étudiées dans le cadre de ce projet. La première conception envisagée est un condensateur monolithique laminé, fabriqué à partir de matériaux préimprégnés et d'électrodes d'aluminium. Ce chapitre présente l'étude préliminaire du potentiel de cette technologie. Des condensateurs plats ont été fabriqués à partir de différents matériaux préimprégnés, et leurs caractéristiques électriques ont été déterminés à partir de mesures par spectroscopie diélectrique et des essais de claquage. Les résultats ont ensuite été discutés.

3.2 Conception d'un condensateur monolithique laminé

Des condensateurs monolithiques laminés secs ont été fabriqués à partir d'empilements successifs de couches de composites préimprégnés (thermodurcissable partiellement réticulé) de résine époxy et d'électrodes. Chaque empilement d'une ou plusieurs couches de matériau préimprégné entre deux électrodes est équivalent à un condensateur plat laminé. Les strates de composite préimprégné sont de forme carrée et leurs dimensions excèdent la largeur du ruban d'électrode, afin d'éviter qu'un court-circuit n'ait lieu au contact de deux électrodes successives. Les électrodes sont des rubans laminés d'aluminium et de 5 μm d'épaisseur, identiques à ceux utilisés dans les condensateurs bobinés. Elles émergent chacune à un côté opposé du condensateur.

Les condensateurs plats empilés et connectés en parallèle forment un condensateur monolithique, équivalent à une sous unité de condensateur haute tension. La Figure 3.1 présente l'empilement d'un condensateur monolithique formé de N couches capacitives. Une couche capacitive correspond à un condensateur formé par un mur diélectrique placé entre

deux électrodes de polarité opposée. Les connexions entre les condensateurs plats sont réalisées par soudage des électrodes rabattues d'un même côté en fonction de leur polarité. Une couche de préimprégné supplémentaire est placée en bas et en haut de la pile afin de recouvrir les électrodes. Chaque strate de composite a une épaisseur d . Une fois l'empilement réalisé lors de la fabrication, le préimprégné est comprimé sous vide et polymérise au cours d'un cycle de cuisson.

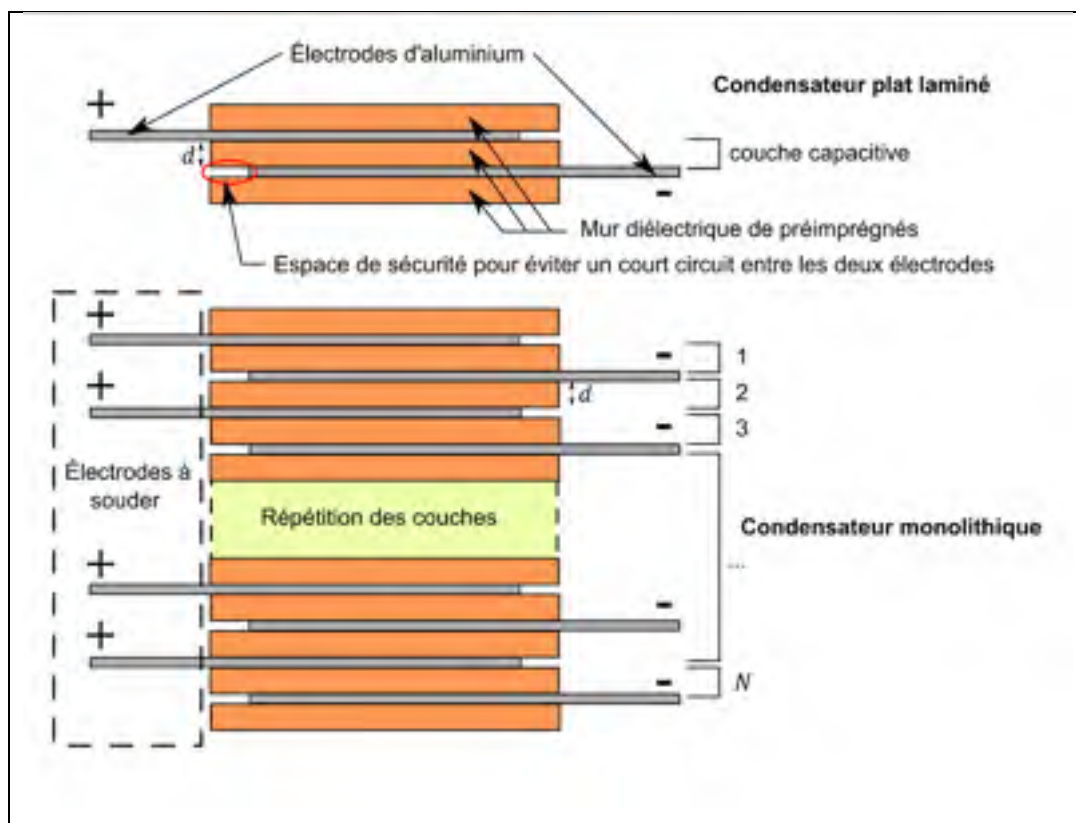


Figure 3.1 Condensateur monolithique formé de N couches capacitatives

Empiler les condensateurs plats associés en parallèle permet de presque doubler la capacité équivalente du condensateur final par rapport à la même association non empilée. Par exemple, dans un empilement de deux condensateurs plat, on retrouve trois couches capacitatives, contre deux si ces condensateurs n'avaient pas été empilés. On peut déterminer facilement le nombre

de couches capacitives N dans un empilement de n condensateurs plats par la formule suivante :

$$N = 2n - 1 \quad (3.1)$$

Le nombre de strates de composite préimprégné utilisées dans l'empilement détermine l'encombrement et la capacité du condensateur monolithique.

On peut calculer le nombre de couches capacitives N nécessaires dans un condensateur monolithique afin d'obtenir la capacité C à partir de la formule d'association de condensateurs plats en parallèle :

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} N \quad (3.2)$$

Avec ε_r la permittivité relative du composite préimprégné, A la surface active d'un condensateur plat et d l'épaisseur du mur diélectrique stratifié du condensateur plat.

L'épaisseur e de la sous-unité peut alors être calculée avec la formule suivante :

$$e = (N + 2)d + (N + 1)D \quad (3.3)$$

Avec D l'épaisseur d'une électrode.

Un calcul préliminaire permet d'évaluer le gain d'encombrement d'un condensateur monolithique par rapport à un condensateur bobiné. Un condensateur monolithique de surface active 0,0025 m, fabriqué à partir de strates de préimprégné à matrice d'époxy de permittivité relative égale à 3 (valeur courante pour des résines époxy) et d'épaisseur 50 μm et de capacité équivalente 72 nF, sera formé de 54 couches. On obtient alors une épaisseur de 3,07 mm contre

3,36 mm pour un condensateur bobiné, soit une diminution de l'encombrement d'environ 8,4%, en plus de l'abandon du système mécanique de soufflet.

Avant d'envisager la fabrication d'un condensateur monolithique, des essais électriques sont menés sur des condensateurs plats laminés afin d'évaluer le potentiel d'une application haute tension de condensateur fabriqué à partir de préimprégnés.

3.3 Choix et caractérisation de préimprégnés

Les préimprégnés ont été choisis en fonction de deux paramètres : leur disponibilité dans le commerce et leur épaisseur. L'épaisseur du matériau est une caractéristique majeure dans le dimensionnement d'un condensateur. Plus l'épaisseur du mur diélectrique est faible, plus la capacité du condensateur sera élevée. De plus, une faible épaisseur permet de minimiser la probabilité d'avoir des défauts de fabrication dans le volume du matériau, donc de limiter le risque de claquage dû à des zones vulnérables dans le mur diélectrique.

Les préimprégnés vendus dans le commerce sont majoritairement dédiés à des applications structurales ou des applications diélectriques à faible tension : leurs propriétés diélectriques ne sont donc souvent pas connues des fabricants. Par conséquent, le choix de matériau s'est orienté vers des préimprégnés thermodurcissables de faible épaisseur, et dont la matrice et le renfort sont des matériaux diélectriques. Tous ces matériaux disposent d'une matrice en résine époxy, mais avec un renfort différent. Le Tableau 3.1 présente les caractéristiques des différents thermodurcissables sélectionnés. Les préimprégnés sélectionnés sont tous dédiés à des usages structuraux à l'exception du DPF 1/50/1 de Krempel et du Laminé 1.

Tableau 3.1 Préimprégnés sélectionnés pour la fabrication de condensateurs plats

Préimprégné	FM300 2M	Thinpreg 402	DPF 1/50/1	Laminé 1
Fabricant	Cytec	NTPT	Krempel	NTPT
Matrice	Résine époxy	Résine époxy	Résine époxy	Résine époxy NTPT 736
Renfort	Polyester	Quartz	PET	PP
Épaisseur nominale (µm)	223	46	70	12,7
Rigidité diélectrique (kV/mm)	/	/	> 6	/
Cycle de polymérisation	30 min jusqu'à 121 °C puis 90 min à 121 °C	30 min à 80 °C puis 2 h à 120 °C. Rampes de 2 °C/min	3 h à 105 °C ou 1,5 h à 120 °C	11 h à 85 °C
Ratio de masse de résine	/	32% - 42%	33%	/

Le préimprégné FM300 2M, est utilisé comme adhésif dans la fabrication de pièces mécaniques composites. C'est le premier matériau à avoir été testé afin de valider le concept d'un condensateur plat réalisé à partir d'un film préimprégné. Le Thinpreg 402 produit par North Thin Ply Technology (NTPT), est un préimprégné à renfort en fibre de quartz imprégné par résine époxy. Le DPF 1/50/1 de Krempel est film de polyester de 46 µm (PET) imprégné à l'aide d'une résine époxy. Deux conditions de polymérisation sont proposées par son fabricant Krempel. Enfin, un composant de condensateur laminé, nommé Laminé 1, a été fabriqué spécialement pour ce projet par NTPT. Ce préimprégné est un film de polypropylène de 12,7 µm fournit par de Condis imprégné d'époxy et laminé sur une électrode d'aluminium de 15 µm d'épaisseur.

3.3.1 Caractérisation par spectroscopie des effets des conditions de polymérisation sur propriétés diélectriques du DPF 1/50/1

Les propriétés diélectriques du DPF 1/50/1 ont été caractérisées par spectroscopie afin d'identifier le cycle de polymérisation le plus adapté parmi les deux cycles conseillés par le fabricant Krempel. Les effets des variations de température et de fréquence sur les propriétés diélectriques ont été mesurés pour deux cycles de polymérisation :

- 3 h à 105 °C sous vide ;
- 1 h 30 min à 120 °C sous vide.

Les essais ont été réalisés avec des électrodes circulaires de 30 mm de diamètre en suivant la méthode de la section 2.2.3. La plage de température testée est de 30 °C à 90 °C, avec un intervalle de 5 °C. Une mesure est aussi effectuée lorsque l'échantillon est redescendu à 30 °C. Cette plage de température correspond à la plage de fonctionnement du condensateur dans les températures positives. La Figure 3.2 présente la variation de $\tan(\delta)$ en fonction de la fréquence et de la température pour un échantillon de DPF 1/501 ayant subi un cycle de polymérisation de 3 h à 105 °C. La Figure 3.3 montre la variation de $\tan(\delta)$ en fonction de la fréquence et de la température pour un échantillon de DPF 1/501 ayant subi un cycle de polymérisation de 1 h 30 min à 120 °C.

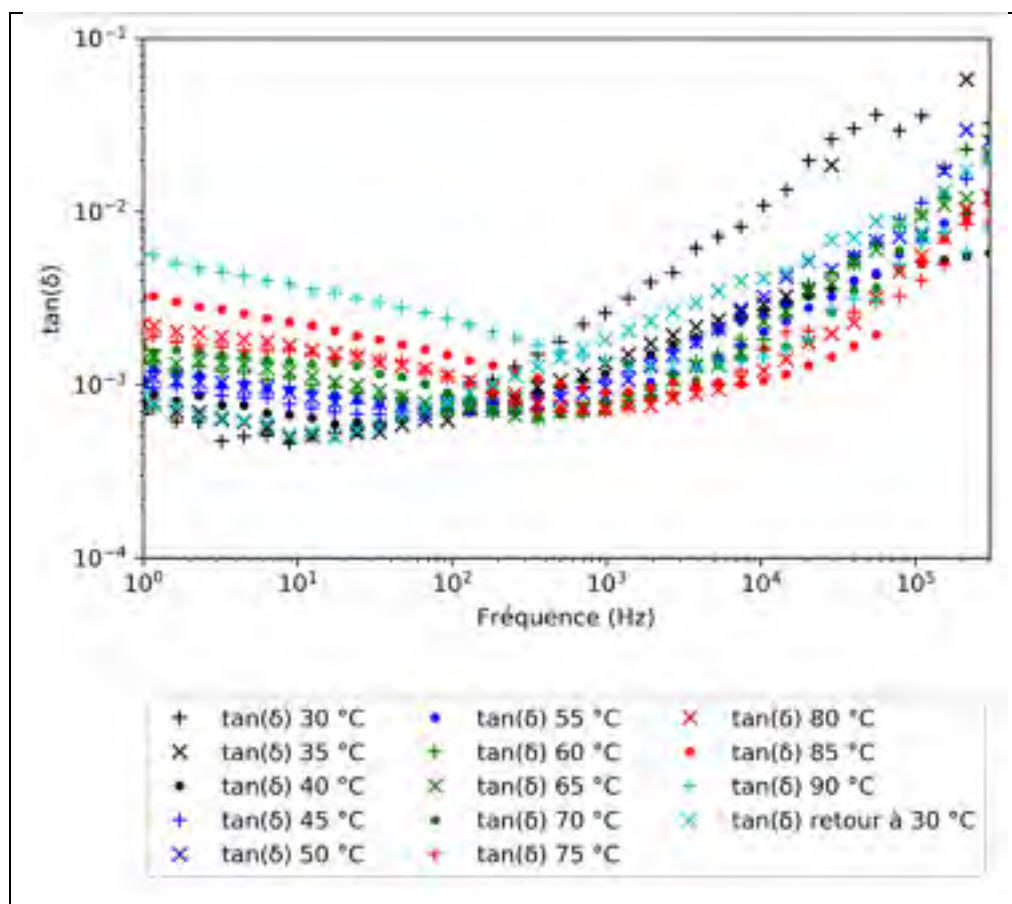


Figure 3.2 Variation de $\tan(\delta)$ en fonction de la fréquence et de la température du DPF 1/50/1 polymérisé à 105 °C pendant 3 h

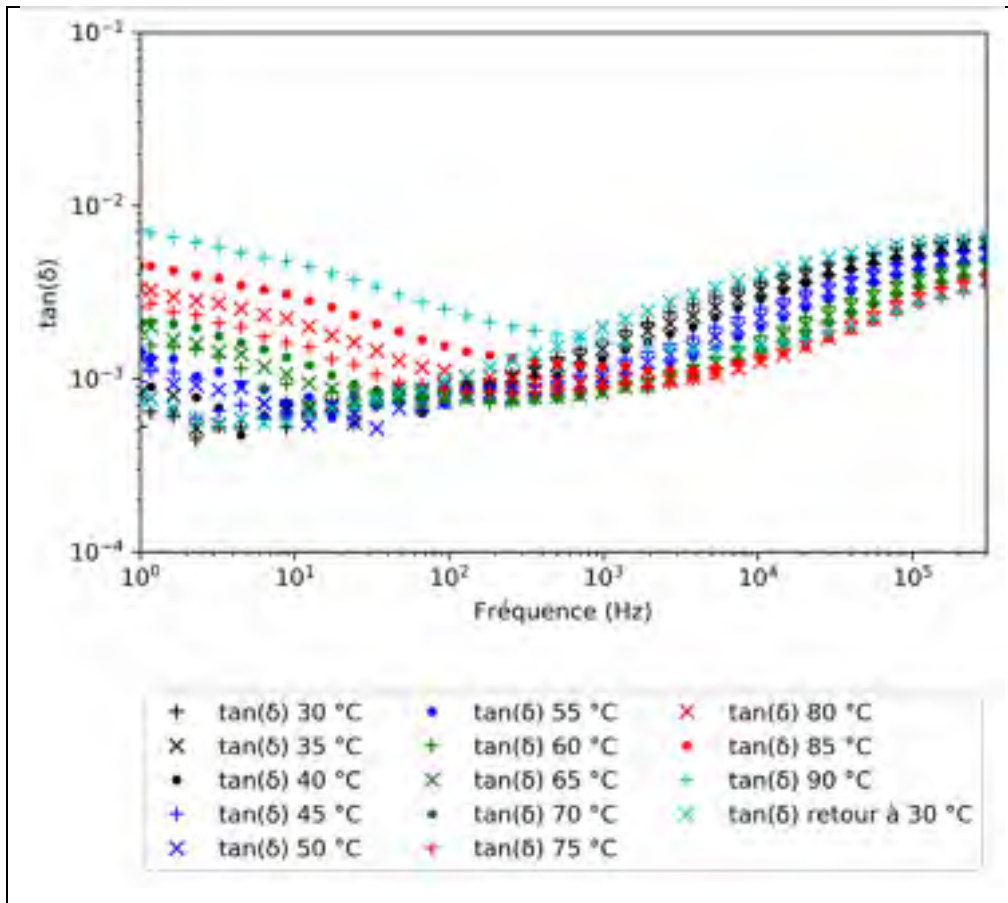


Figure 3.3 Variation de $\tan(\delta)$ en fonction de la fréquence et de la température du DPF 1/50/1 polymérisé à 120 °C pendant 1 h 30 min

On observe que les tangentes de l'angle de perte des deux échantillons à 50 Hz et 60 Hz sont inférieures à la valeur de 2×10^{-3} fixée dans le cahier des charges du condensateur sec. Néanmoins, $\tan(\delta)$ à 60 Hz augmente avec la température et atteint 5×10^{-3} à 90 °C. À 80 °C, la tangente de l'angle de perte reste toutefois acceptable pour les deux conditions de polymérisation. Lors du retour de 90 °C à 30 °C, la tangente de l'angle de perte retrouve une valeur similaire à celle qu'elle avait initialement à 30 °C, pour les deux cycles de cuisson à 60 Hz. Cela suggère que la polymérisation de la résine époxy est presque totale pour les deux cycles et n'altère pas le film de PET, les propriétés diélectriques des échantillons étant invariantes. La stabilité thermique des propriétés diélectriques du DPF 1/50/1 est donc vérifiée.

La Figure 3.4 compare $\tan(\delta)$ à 67 Hz, fréquence de mesure la plus proche de la fréquence de fonctionnement du condensateur. On remarque que la tangente est sensiblement la même pour les deux conditions de cuisson, quelle que soit la température.

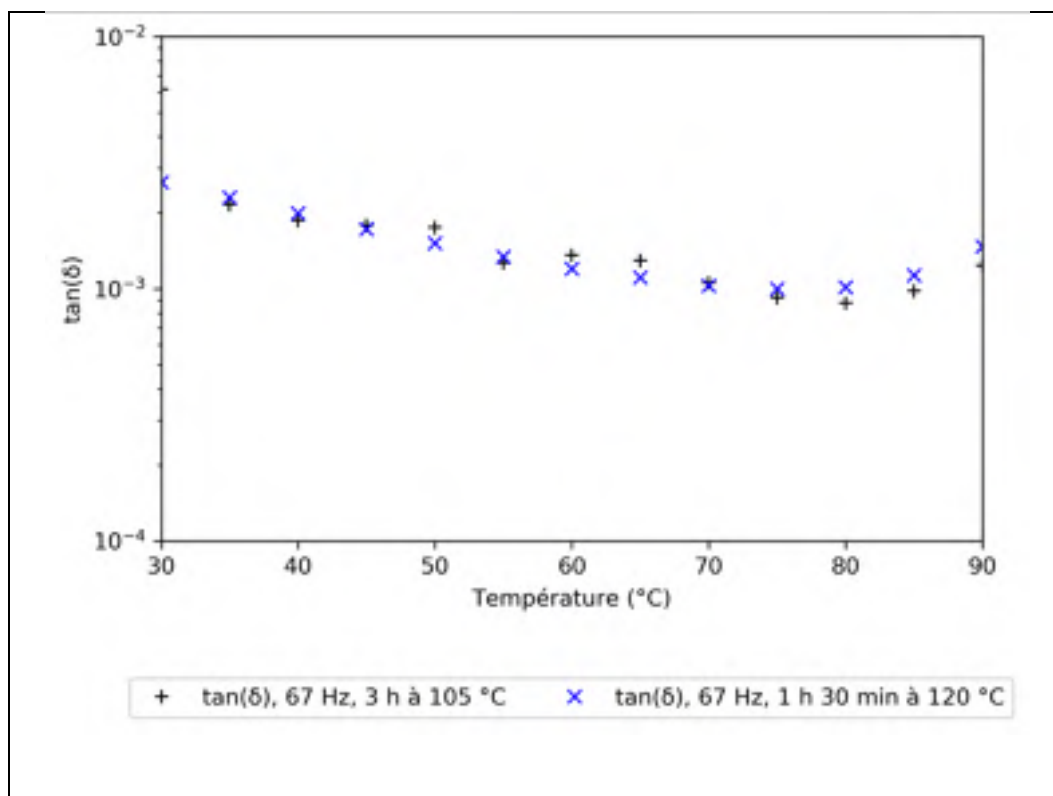


Figure 3.4 Comparaison de $\tan(\delta)$ en fonction de la température à 67 Hz du DPF 1/50/1 polymérisé à 120 °C pendant 1 h 30 min et à 105 °C pendant 3 h

L'évolution de la tangente de l'angle de perte d'un échantillon non polymérisé a été mesurée lors d'une cuisson de 5 heures à 90 °C. Un balayage en fréquence a été effectué toutes les 30 minutes et les résultats sont présentés à la Figure 3.5. Les paramètres de balayage en fréquence sont les mêmes que ceux appliqués lors du balayage en température.

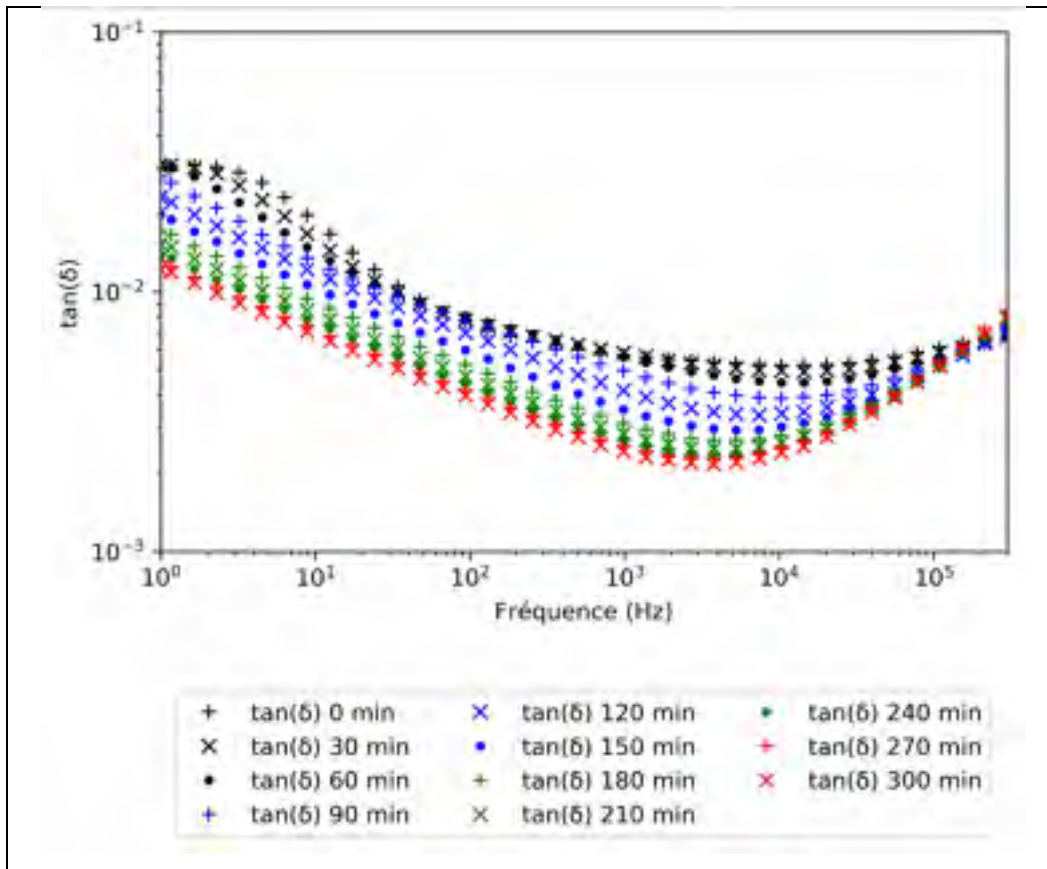


Figure 3.5 Évolution de $\tan(\delta)$ du DPF 1/50/1 non polymérisé maintenu à 90 °C pendant 5 heures

On remarque que $\tan(\delta)$ décroît au cours du temps à cause de la diminution de la polarité de la résine époxy à mesure qu'elle polymérise et forme un réseau réticulé.

Les mesures par spectroscopie ayant été réalisées sous atmosphère non contrôlée, l'échantillon de DPF 1/50/1 non durci a polymérisé en présence d'oxygène. Une oxydation du film au cours de l'essai a donc pu avoir lieu. De plus, le film de PET pourrait subir un vieillissement au cours du cycle de cuisson à 90 °C. L'effet du temps de polymérisation à 67 Hz, présenté à la Figure 3.6, montre qu'après une légère diminution, la tangente de l'angle de perte se stabilise au bout de 300 minutes.

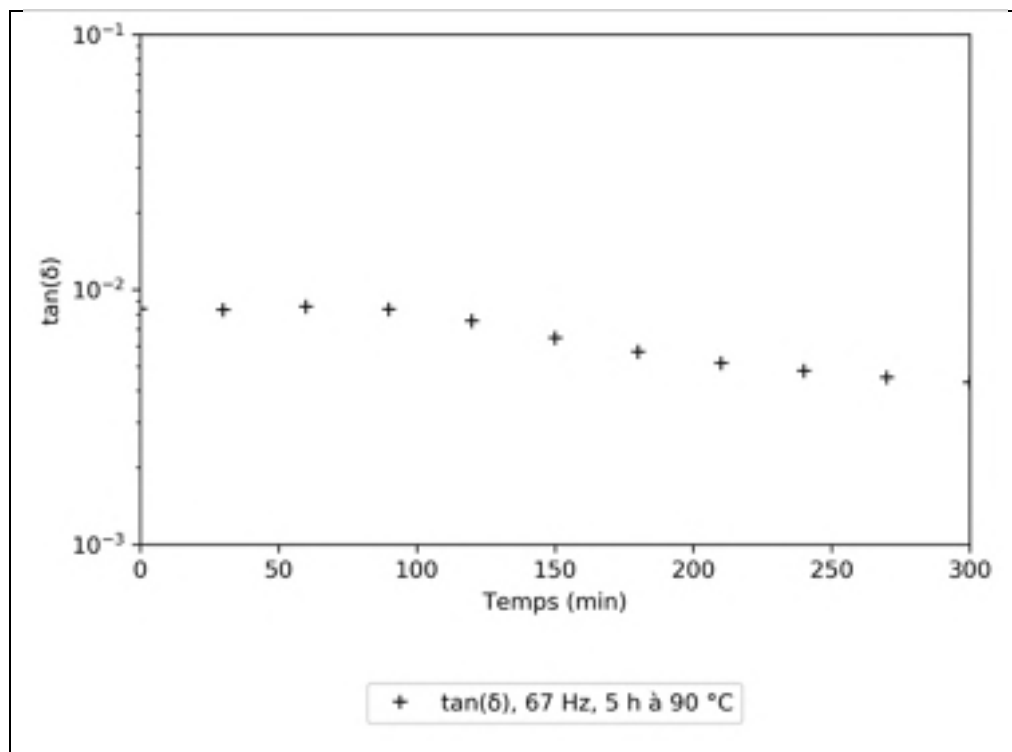


Figure 3.6 Évolution de $\tan(\delta)$ à 67 Hz du DPF 1/50/1 non polymérisé maintenu à 90 °C pendant 5 heures

En règle générale, le taux de réaction chimique double à chaque fois que la température augmente de 10 °C (Gurit Guide Composite) ; on peut s'attendre à obtenir un matériau presque polymérisé après 107 min à 105 °C, et 38 min à 120 °C, des temps inférieurs aux cycles de cuissons conseillés par le fabricant. Les deux cycles proposés étant adéquats, on préférera le cycle de 1 h 30 min à 120 °C afin de minimiser les temps de fabrication.

3.3.2 Caractérisation des effets des conditions de polymérisation sur la rigidité diélectrique du DPF 1/50/1

La rigidité diélectrique du DPF 1/50/1 a été caractérisée lors d'essais de claquage d'échantillons de préimprégné DPF 1/50/1 ayant subi 3 cycles de cuisson différents :

- Non polymérisé, tel que livré par le fabricant Krempel ;
- 3 h à 105 °C sous vide ;
- 1 h 30 min à 120 °C sous vide.

Pour chaque cycle de polymérisation, 20 échantillons ont été testés dans un bain d'huile diélectrique en suivant la méthode de la section 2.2.5.1. Les diagrammes de Weibull des résultats sont présentés à la Figure 3.7. Les intervalles de confiance à 90% sont représentés par des lignes en pointillés et les approximations linéaires par des lignes droites. Le Tableau 3.2 présente l'épaisseur moyenne des échantillons, leur écart type ainsi que les paramètres de Weibull approximatés pour chacun des 3 cycles de polymérisation.

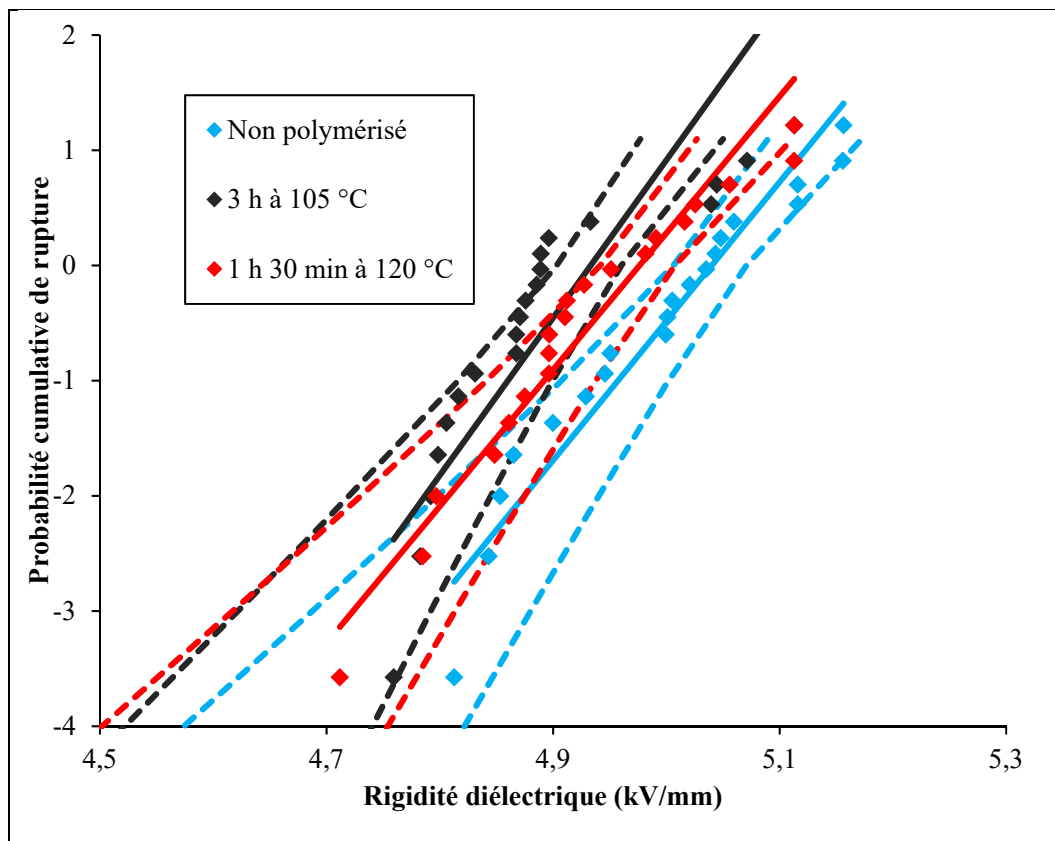


Figure 3.7 Diagrammes de Weibull avec intervalles de confiance à 90% pour les différents cycles de cuisson du DPF 1/50/1

Tableau 3.2 Influence du cycle de polymérisation sur l'approximation des paramètres de Weibull du DPF 1/50/1

Conditions de polymérisation	Épaisseur moyenne (μm)	Écart type de l'épaisseur (μm)	Facteur d'échelle α (kV/mm)	Facteur de forme β	Coefficient de corrélation
Non polymérisé	67	4	154,5	12,1	0,97
3 h à 105 °C	70	5	138,8	13,7	0,87
1 h 30 min à 120 °C	69	5	144,9	11,9	0,97

Pour le matériau non polymérisé et le cycle de cuisson à plus haute température, la distribution de Weibull à 2 paramètres est adéquate. Les deux coefficients de corrélation sont supérieurs à 0,94, valeur seuil fixée par la norme pour obtenir une adéquation correcte à partir de 20 mesures. En revanche, le coefficient de corrélation du cycle à température moins élevée est inférieur au seuil de 0,94. Cet écart d'adéquation se vérifie sur le diagramme de Weibull, où l'on peut constater que les valeurs suivent une courbe concave vers le bas au lieu d'une ligne droite. Le paramètre de forme de ce cycle, plus élevé que les autres donc traduisant une dispersion plus faible, peut s'expliquer par un ajustement inadéquat du modèle plutôt qu'une réelle différence de dispersion de la rigidité diélectrique. Cette hypothèse est confirmée sur le diagramme, où l'on peut observer que les valeurs extrêmes de rigidité diélectriques (pourcentages cumulés de défaillance faible et élevé) pour les deux échantillons ayant suivis un cycle de polymérisation sont très similaires.

Le Tableau 3.2 montre que le DPF 1/50/1 non polymérisé présente la plus haute rigidité diélectrique des trois cycles. Il est suivi par le cycle de 1 h 30 min à 120 °C puis le cycle de 3 h à 105 °C. Néanmoins, au regard de l'instabilité en température des propriétés diélectriques, il n'est pas envisageable d'utiliser un préimprégné non polymérisé dans une application de condensateur sec. Les rigidités diélectriques et les tangentes de l'angle de perte à 67 Hz pour

les deux cycles de cuisson étant du même ordre de grandeur, on préférera le cycle de 1 h 30 min à 120 °C qui offre un temps de fabrication plus court.

En prenant la rigidité diélectrique caractéristique α (probabilité de défaillance de 63% environ) du cycle à 120 °C (145 kV/mm) et une épaisseur du préimprégné de 70 μ m, le potentiel admissible avant claquage pour un condensateur plat sera supérieur à 10 kV. Cette tension sera ramenée à 7 kV avec une probabilité de survie de 99%. On constate que ces tensions sont beaucoup plus élevées que la tension de fonctionnement nominale d'une sous unité bobinée, d'environ 1,5 kV.

3.4 Méthode de fabrication des condensateurs plats laminés

Des condensateurs plats laminés ont été fabriqués par moulage par compression sous vide à partir des matériaux sélectionnés. Des strates de préimprégnés, séparées par des rubans d'électrode d'aluminium, sont empilées sur une plaque de fabrication en aluminium. La surface active de chaque condensateur correspond à la surface de chevauchement des électrodes. Les condensateurs sont ensuite enveloppés dans un sac sous vide et comprimés à 1 bar contre la plaque de fabrication par l'action de la pression atmosphérique sur le sac sous vide.

Dans le cas de condensateur stratifié de faible épaisseur (0,02 mm), des intercalaires en silicone de 3 mm ou 6 mm d'épaisseur sont ajoutés au-dessus des condensateurs, entre le tissu d'arrachage et le feutre de drainage. Ces intercalaires de silicone permettent de répartir la pression de compaction autour du condensateur. On peut distinguer les intercalaires de silicone sur le montage de fabrication des condensateurs en FM300, à la Figure 3.8.



Figure 3.8 Moulage de condensateurs plats FM300 lors d'un essai de tenu du vide du sac

Une contre-plaque d'aluminium est ajoutée au-dessus des condensateurs fabriqués en Thinpreg 402 afin d'augmenter la pression effective de compaction. La pression initiale de 1 bar appliquée sur les condensateurs est alors multipliée par le rapport r , ratio entre l'aire de la surface supérieure de la contre-plaque $A_{contre\ plaque}$ et l'aire totale occupée par les condensateurs. Le rapport est explicité pour n condensateurs d'aire $A_{condensateur}$ par la formule suivante :

$$r = \frac{A_{contre\ plaque}}{n \cdot A_{condensateur}} \quad (3.4)$$

3.4.1 Configuration des empilements

Quatre séries de condensateurs plats ont été fabriquées à partir de chaque préimprégné, leurs dénominations sont données dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 Récapitulatif des séries fabriquées et les préimprégnés associés

Série de fabrication	LAM_02	LAM_04	LAM_05	LAM_06
Préimprégné	FM 300	Thinpreg 402	DPF 1/50/1	Laminé 1

Les condensateurs des séries LAM_02 et LAM_05 sont formés d'une couche de préimprégné de 70 mm x 70 mm placées entre deux rubans d'électrode d'aluminium de 50 mm de large et de 5 μ m d'épaisseur. Des couches de préimprégné de 70 mm x 70 mm sont rajoutées au-dessus et en dessous du condensateur afin d'isoler les électrodes. Le mur diélectrique des condensateurs en Thinpreg 402 (série LAM_04) est formé par deux strates de préimprégnés, et différentes orientations d'angle de fibre ont été testées. La configuration des empilements des condensateurs des séries LAM_02, LAM_04 et LAM_05 est donnée à la Figure 3.9. Leur surface active est d'environ 50 mm x 50 mm.

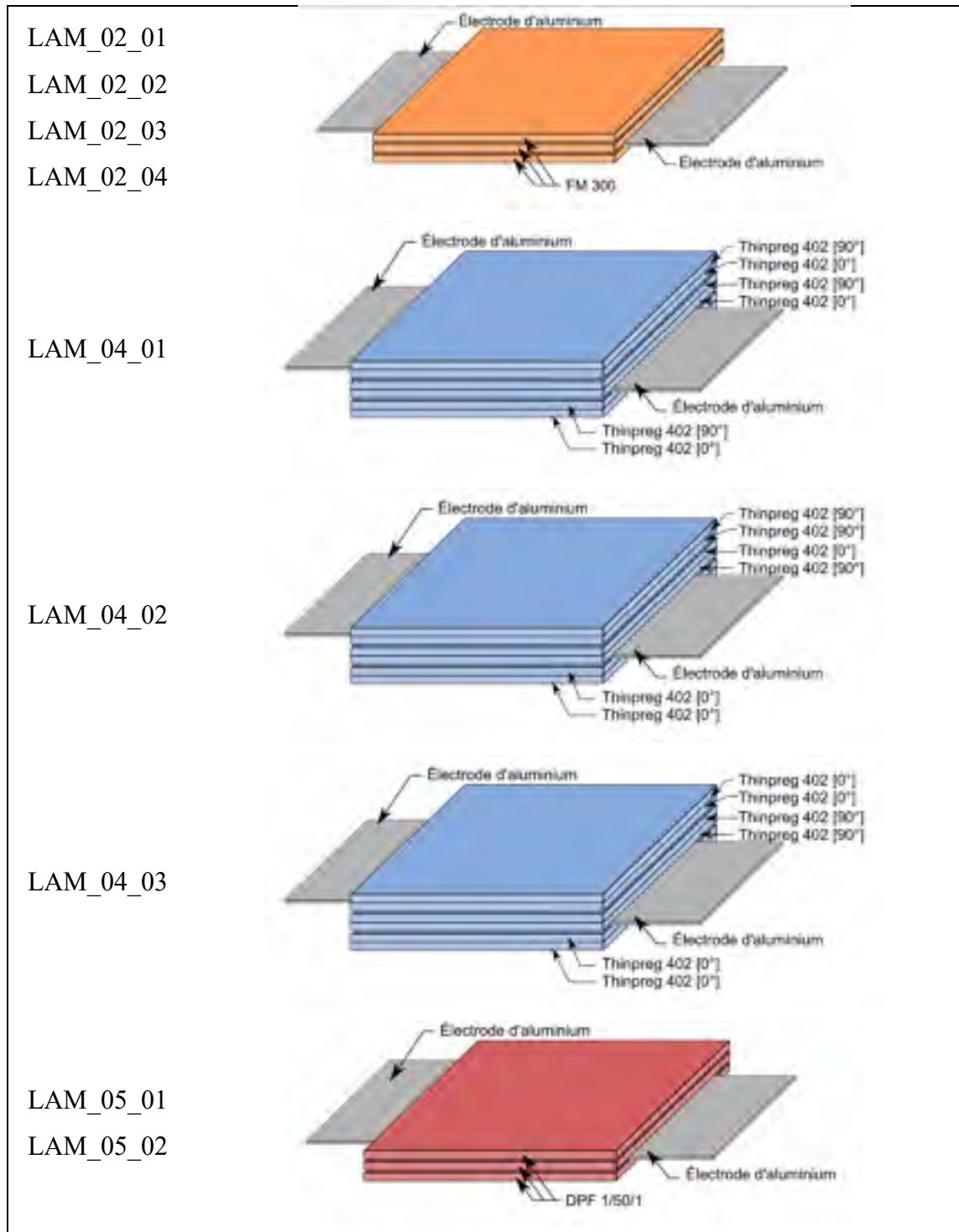


Figure 3.9 Nomination et configuration des empilements des condensateurs plats

La configuration des 5 condensateurs réalisés en Laminé 1 (série LAM_06, nommés de A à E) diffère légèrement des séries précédentes. Le Laminé 1 est un film de polypropylène de 12,7 μm d'épaisseur et de largeur 100 mm, imprégné d'époxy et laminé sur une électrode d'aluminium de 15 μm d'épaisseur et de 90 mm de large. Initialement, le film de polypropylène devait dépasser les bordures de l'électrode de 10 mm des deux côtés de la largeur afin de s'assurer que les électrodes soient encapsulées par le préimprégné. Néanmoins, le film de polypropylène du préimprégné livré ne dépasse l'électrode que d'un seul côté (Figure 3.10 (a)).

Afin d'éviter que deux bordures d'électrodes ne soient en vis-à-vis, sans couche de préimprégné pour les séparer, une nouvelle configuration a été utilisée. Deux couches de préimprégné Laminé 1 sont superposées, avec un décalage de 90° entre les deux strates (Figure 3.10 (b)). La couche supérieure a une longueur de 120 mm et la couche inférieure, une longueur de 100 mm. Sur sa longueur, la couche supérieure dépasse les bordures du film de polypropylène de la couche inférieure de 10 mm, afin d'assurer l'isolation de l'électrode inférieure (Figure 3.10 (c)). Sur sa largeur, la couche supérieure est décalée de 10 mm par rapport à la couche inférieure pour la même raison. La surface active du condensateur ainsi formé est de 80 mm x 90 mm (Figure 3.10 (d)). Les condensateurs en Laminé 1 ne disposent pas de couche d'encapsulation supérieure, car la quantité de Laminé 1 disponible était limitée.

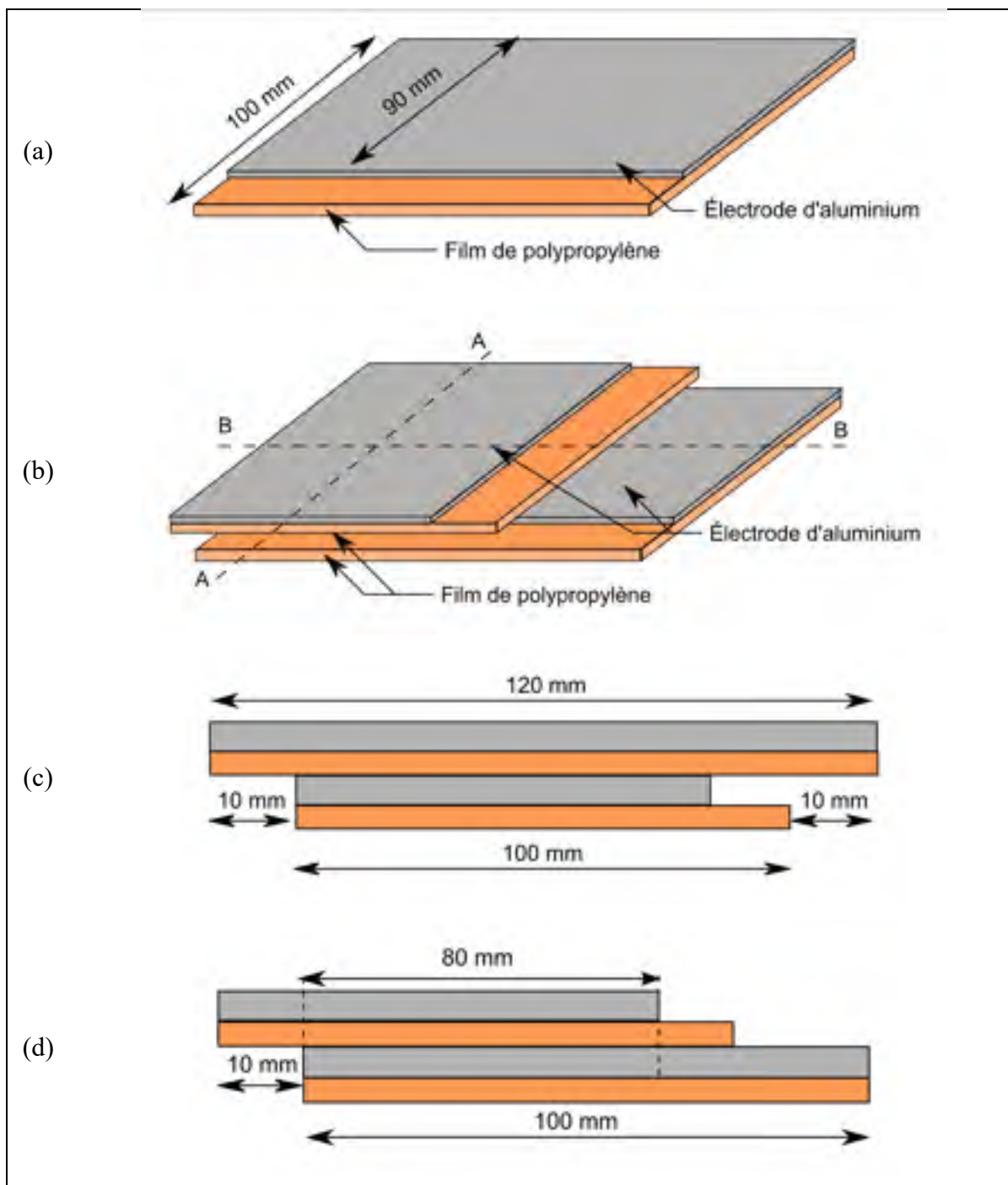


Figure 3.10 (a) préimprégné de Laminé 1 et (b) configuration de condensateur plat, (c) en vue de coupe A-A et en (d) vue de coupe B-B

3.4.2 Paramètres de fabrication

Les strates de préimprégné et les électrodes sont déposées une à une sur la plaque de fabrication en aluminium. L'ANNEXE I présente la méthode d'empilement des couches de préimprégné et des électrodes d'aluminium pour obtenir des condensateurs plats.

Lors de la fabrication, il a été observé que le rouleau de Laminé 1 présente deux défauts de fabrication pouvant nuire aux performances électriques du condensateur. La Figure 3.11 montre que le préimprégné contient des excès de résine qui peuvent représenter des irrégularités d'épaisseur de diélectrique dans l'empilement du condensateur. De plus, des zones du film où l'électrode d'aluminium est repliée ou froissée représentent des sites de concentration de champ pouvant mener à un claquage prématuré du condensateur.

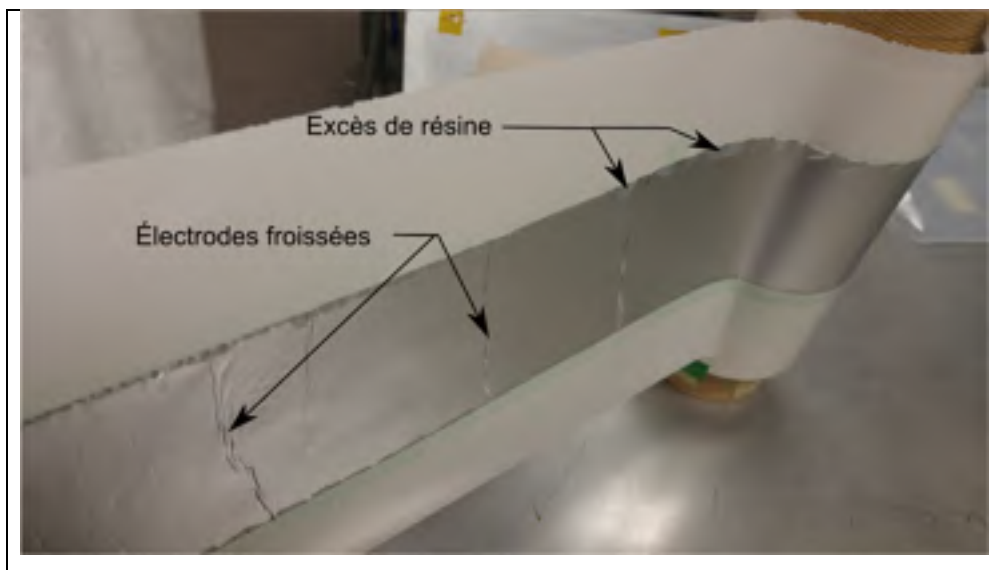


Figure 3.11 Photo des défauts du Laminé 1

Après avoir été assemblés, les condensateurs sont recouverts par un tissu d'arrachage et un feutre de drainage. Le premier facilite l'arrachage du sac et le second permet de s'assurer que le vide est effectué dans tous les recoins de la plaque de fabrication. Le sac sous vide est placé

autour des condensateurs à l'aide d'un ruban scellant et un vide de 20 mbar est créé par l'intermédiaire d'une pompe. Les condensateurs sont comprimés à une pression effective de 1 bar contre la plaque de fabrication, par l'action de la pression atmosphérique sur le sac sous vide. L'étanchéité du montage est vérifiée avec un manomètre en s'assurant que le sac sous vide conserve son niveau de vide quelques minutes après avoir débranché la pompe à vide.

Lorsque la contre-plaque est utilisée, une pellicule perforée et un tissu d'arrachage sont placés entre le condensateur et la plaque afin de pouvoir bâtir le vide et démouler facilement les condensateurs. Un feutre de drainage est ajouté au-dessus de la plaque et rejoint le tissu d'arrachage en périphérie du moule afin de garantir le vide partout entre les deux plaques. La Figure 3.12 présente le montage de moulage par compression sous vide utilisé avec la contre-plaque.

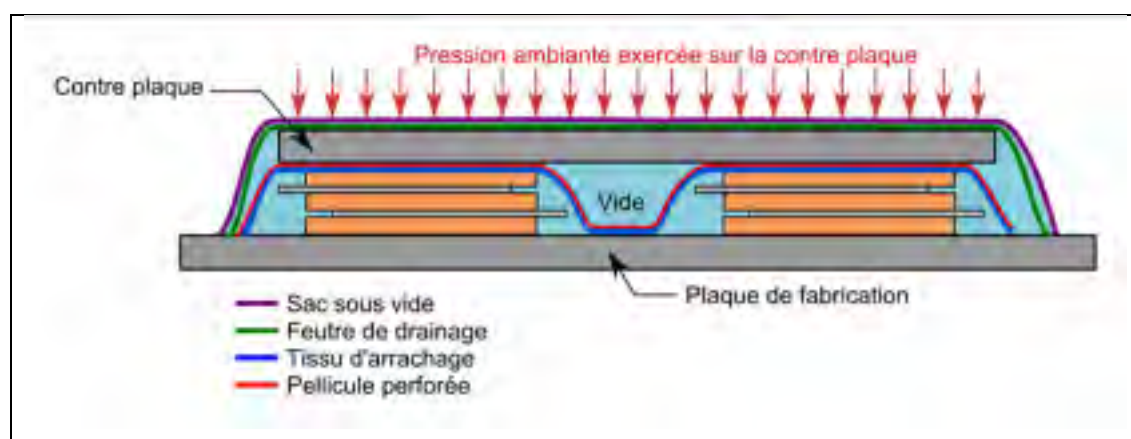


Figure 3.12 Schéma du moulage par compression sous vide avec contre plaque

Le Tableau 3.4 détaille le montage du moulage par compression sous vide et les pressions effectives de chaque série de condensateurs fabriqués.

Tableau 3.4 Configuration et pression effective pour chaque série de fabrication

Nom de la série de fabrication	LAM_02	LAM_04	LAM_05	LAM_06
Préimprégné	FM300 2M	Thinpreg 402	DPF 1/50/1	Laminé 1
Épaisseur nominale des préimprégnés (μm)	223	46	70	/
Nombre de condensateurs	4	3	2	5
Contre plaque		x		
Intercalaire de silicone	x	x		
Feutre de drainage de vide	x	x	x	x
Tissu d'arrachage	x	x	x	x
Pellicule perforée	x		x	x
Pression équivalente (bar)	< 1	$\approx 3,6$	≈ 1	≈ 1

Les cycles de polymérisation et les épaisseurs nominales des préimprégnés sont présentés dans Tableau 3.5.

Tableau 3.5 Paramètres de fabrications

Préimprégné	Épaisseur nominale (μm)	Cycle de polymérisation
FM300 2M	223	30 min jusqu'à 121 °C puis 90 min à 121 °C
Thinpreg 402	46	30 min à 80 °C puis 2 h à 120 °C Rampes de 2 °C/min
DPF 1/50/1	70	3 h à 105 °C ou 1,5 h à 120 °C
Laminé 1	12,7	11 h à 85 °C

3.4.3 Problème d'adhésion entre le film de polypropylène et la résine époxy

Une délamination entre l'électrode d'aluminium et le film de polypropylène des condensateurs LAM_06_D et LAM_06_E a été observée après démoulage. L'adhésion entre les deux couches est si faible qu'elles peuvent être séparées en frottant le condensateur entre le pouce et l'index, comme le montre la Figure 3.13.



Figure 3.13 Délamination entre l'électrode d'aluminium et le film de polypropylène du condensateur LAM_06_D

Le polypropylène est un matériau non polaire avec une tension de surface peu élevée ce qui explique la mauvaise adhésion avec la résine époxy. Un traitement corona permettrait d'augmenter la mouillabilité du film par la résine époxy (Vlaeva et al., 2012).

3.5 Essais électriques

La résistance et la capacité des condensateurs fabriqués sont mesurées à l'aide d'un multimètre afin de s'assurer qu'ils sont fonctionnels. Les valeurs sont présentées dans le Tableau 3.6. Tous les condensateurs sont fonctionnels à l'exception des condensateurs LAM_06_D et LAM_06_E.

Tableau 3.6 Résistance et capacité des condensateurs plats mesurées au multimètre

Condensateur	LAM_02_01	LAM_02_02	LAM_02_03	LAM_02_04	
Capacité (nF)	0,47	0,51	0,47	0,45	
Résistance (Ω)	6000	6000	6000	6000	
Condensateur	LAM_04_01	LAM_04_02	LAM_04_03		
Capacité (nF)	1,8	1,3	2,8		
Résistance (Ω)	∞	∞	∞		
Condensateur	LAM_05_01	LAM_05_02			
Capacité (nF)	1,2	1,3			
Résistance (Ω)	∞	∞			
Condensateur	LAM_06_A	LAM_06_B	LAM_06_C	LAM_06_D	LAM_06_E
Capacité (nF)	3	3,1	3,1	/	/
Résistance (Ω)	∞	∞	∞	/	/

3.5.1 Spectroscopie diélectrique

La capacité et la tangente de l'angle de perte des condensateurs plat ont été caractérisées par spectroscopie en suivant la méthode de la section 2.2.3. Le condensateur plat est soumis à une tension alternative de 1 V et ses propriétés diélectriques sont mesurées pour 46 valeurs de fréquence différentes. Ces valeurs sont uniformément réparties sur l'échelle logarithmique d'un intervalle de fréquence de 3×10^5 Hz à 1 Hz. Une mesure à 60 Hz a été prise pour les condensateurs de la série LAM_06. Avant la mesure, les électrodes d'aluminium sont préalablement renforcées à l'aide d'un scotch cuivré conducteur pour éviter leur arrachage. Les capacités et $\tan(\delta)$ des condensateurs testés sur la plage de 1 Hz à 10^3 Hz sont présentés à la Figure 3.14. Les résultats à plus haute fréquence n'ont pas été présentés, car la fréquence cible est celle de fonctionnement du condensateur, soit 50 Hz ou 60 Hz. La faible épaisseur des électrodes d'aluminium les rend particulièrement fragiles lors des manipulations pour

brancher les condensateurs aux montages d'essais électriques. Le condensateur LAM_02_01 n'a pas pu être testé en spectroscopie, car ses électrodes ont été arrachées après le démoulage.

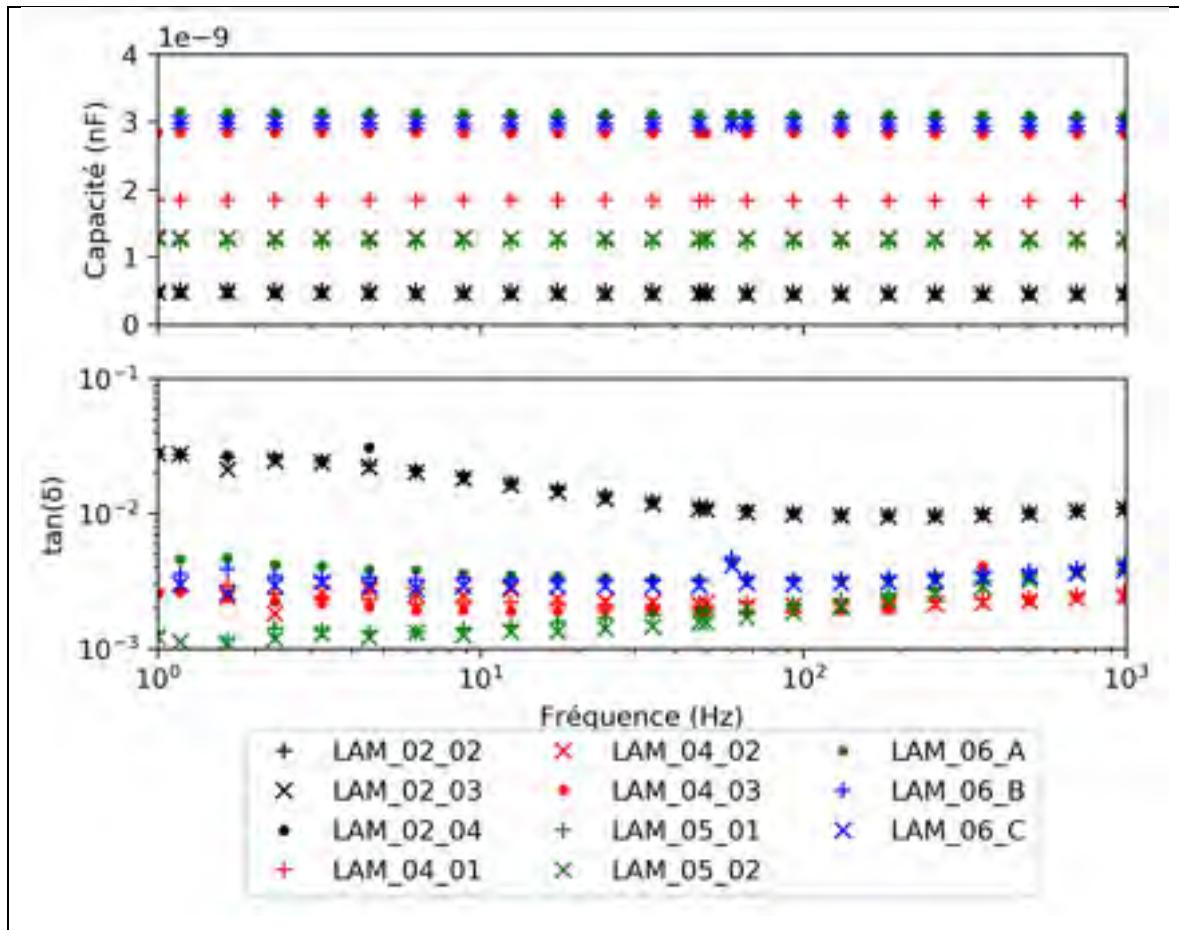


Figure 3.14 Capacité et $\tan(\delta)$ des condensateurs plats laminés sur la plage de fréquence de 1 Hz à 10^3 Hz

La capacité des condensateurs Laminé 1 est supérieure à celles des autres condensateurs d'un facteur 2,5 environ. Cette valeur plus élevée s'explique par la différence de surface active : les condensateurs en Laminé 1 ont une surface active de 7200 mm^2 contre une surface active de 2500 mm^2 pour les autres séries, soit un ratio de 2,88. Pour la même surface active, on obtient une capacité similaire aux autres condensateurs avec un préimprégné Laminé 1. On observe une grande disparité des valeurs de capacité pour les condensateurs en Thinpreg 402. Le

condensateur LAM_04_03 a une capacité plus élevée que les deux autres condensateurs de la série LAM_04 alors qu'ils ont été fabriqués dans les mêmes conditions. Cet écart peut s'expliquer par l'orientation des fibres du diélectrique : les deux couches de Thinpreg 402 constituant le mur diélectrique du LAM_04_03 ont leurs fibres orientées dans le même sens. Lors de l'aplanissement du condensateur, les fibres des deux films peuvent plus facilement s'imbriquer : on obtient alors un condensateur moins épais, avec une capacité plus élevée. Les condensateurs en FM 300 ont une tangente d'angle de perte largement supérieure au seuil de 2×10^{-3} à 60 Hz. En revanche, les condensateurs en DPF 1/50/1, en Thinpreg 402 et en Laminé 1 ont une tangente de l'angle de perte proche du seuil à 60 Hz.

3.5.2 Essai de claquage

Les condensateurs plats fabriqués ont été claqués au cours d'essai de claquage. Le montage et le protocole de mesure sont détaillé à la section 2.2.5.2. La tension de claquage et la rigidité diélectrique calculée pour chaque condensateur sont présentées dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7 Tension de claquage et rigidité diélectriques des condensateurs plats laminés

Condensateur	Épaisseur de diélectrique (μm)	Capacité (nF)	Tension de claquage (kV)	Rigidité diélectrique (kV/mm)
LAM_02_02	223	0,51	1,3	5,8
LAM_02_03	223	0,47	2,23	10
LAM_04_02	46	1,3	0,23	5
LAM_04_03	46	2,8	0,21	4,5
LAM_05_01	70	1,2	2,27	32,4
LAM_06_B	12,7	3,1	2,27	178,7
LAM_06_C	12,7	3,1	2,93	230,7

Les condensateurs LAM_02_04, LAM_04_01, LAM_05_02 et LAM_06_A n'ont pas pu atteindre les essais électriques pour cause d'arrachage d'électrode lors de la mise en place sur les bancs d'essai.

Les claquages des 7 condensateurs testés sont visibles sous la forme de zone calcinée en bordure des électrodes, comme montrés sur la Figure 3.15.



Figure 3.15 Condensateur LAM_06_B après claquage.
La pointe du stylo indique le site du claquage.

La rigidité diélectrique des condensateurs fabriqués en FM 300 et en Thinpreg 402 est relativement faible pour une application haute tension. Les condensateurs en DPF 1/50/1 affichent une rigidité diélectrique un peu plus élevée que ceux en FM 300 et en Thinpreg 402. Néanmoins, la rigidité diélectrique du condensateur en DPF 1/50/1 reste éloignée de la rigidité mesurée lors des essais de claquage en champs homogènes dans un bain d'huile. Cet écart s'explique par le fait que, dans un condensateur plat laminé, les bordures d'électrodes sont des

sites de concentration de champ élevée. Le matériau diélectrique en périphérie est donc susceptible de claquer à une tension plus basse. Enfin les surfaces actives des condensateurs plats sont plus grandes que les surfaces des échantillons testés en bain d'huile. Cela augmente le risque d'avoir un défaut (irrégularité, poussière) dans le préimprégné qui représenterait un point faible, susceptible de claquer à une tension plus basse. La rigidité diélectrique des condensateurs de la série LAM_06 est de l'ordre de 200 kV/mm, et est supérieure d'un ordre de grandeur par rapport aux valeurs des autres condensateurs.

3.6 Conclusion sur le potentiel de la technologie de condensateur monolithique laminé haute tension

Des condensateurs plats ont été fabriqués à partir de plusieurs préimprégnés différents. Les condensateurs fabriqués en FM 300 et en Thinpreg 402 ne présentent pas une rigidité diélectrique suffisamment élevée afin d'être envisagée comme matériau pour une application haute tension.

Les condensateurs en DPF 1/50/1 présentent des caractéristiques électriques plus intéressantes. La tangente de l'angle de perte diélectrique est proche du seuil de 2×10^{-3} demandé et la rigidité diélectrique sur le film testé dans un bain d'huile est supérieure à la rigidité du mur diélectrique des condensateurs imprégné d'huile (112 kV/mm). Néanmoins, la rigidité diélectrique du condensateur claqué (32,4 kV/mm) n'est pas suffisante pour soutenir la tension de test de 4 kV.

Les condensateurs fabriqués en Laminé 1 laissent présager de bonnes performances à haute tension. La tangente de l'angle de perte est légèrement supérieure au seuil à 2×10^{-3} , mais reste très proche. Leur rigidité diélectrique est supérieure à l'exigence de 112 kV/mm du cahier des charges. Néanmoins, la tension de claquage est inférieure à la tension de test de 4 kV. La tension de claquage pourrait être augmentée utilisant deux couches de polypropylène au lieu d'une comme mur diélectrique. Néanmoins, doubler l'épaisseur divise la capacité des couches capacitatives par deux, donc il faudra deux fois plus de couches capacitatives pour atteindre la capacité équivalente d'une sous unité.

Le Tableau 3.8 présente le nombre de couches capacitives nécessaires pour fabriquer un condensateur monolithique d'une capacité de 72 nF, équivalente à une sous unité bobinée d'un condensateur imprégné d'huile (épaisseur de 3,36 mm). Les calculs ont été effectués pour des couches capacitives de DPF 1/50/1, de Laminé 1 et d'un Laminé 2 constitué de deux épaisseurs de polypropylène. Les couches capacitives ont une surface active de 2500 mm² (50 mm x 50 mm). La capacité étant directement proportionnelle à la surface active, la capacité d'une couche capacitive fabriquée en Laminé 1 et ayant une surface active de 2500 mm² a été déduite de la capacité des condensateurs de la série LAM_06, ayant des surfaces actives de 7200 mm².

Tableau 3.8 Nombre de couches capacitives et épaisseur d'une sous unité monolithique de 72 nF et de surface active 2500 mm² pour différentes épaisseurs de diélectrique

	DPF 1/50/1	Laminé 1	Laminé 2
Nombre de strates dans le mur diélectrique	1	1	2
Épaisseur du mur diélectrique (µm)	70	12,7	25,4
Capacité d'une couche capacitive (nF)	1,2	1,07	0,54
Épaisseur des électrodes (µm)	5	15	15
Nombre de couches capacitives	60	67	134
Épaisseur de la sous-unité monolithique (mm)	4,65	1,90	5,48
Gain d'encombrement (%) par rapport à une bobine	-38,2	43,5	-63

Une sous unité bobine de 72 nF a une épaisseur de 3,36 mm. Aucun gain d'encombrement ne sera possible avec un condensateur en DPF 1/50/1 ou en Laminé 2. Un condensateur monolithique de 132 sous unités fabriquées en Laminé 2 et associées en série aurait une longueur totale de 724 mm, contre 600 mm pour un condensateur imprégné, soit une augmentation de longueur de presque 21%. Bien que les préimprégnés de Laminé 1 soient beaucoup plus faciles à manipuler que les autres préimprégnés, la production d'un prototype reste fastidieuse à la main. Une production à grande échelle nécessitera une automatisation qui

permettrait d'assurer une reproductibilité et une vitesse de fabrication adéquate avec les cadences attendues.

La mauvaise adhésion entre le polypropylène la résine époxy engendre des délaminations entre le film et les électrodes d'aluminium. D'un point de vue mécanique, ces défauts affecteront la durée de vie du condensateur. Un traitement du film de polypropylène serait envisageable afin d'augmenter son affinité avec la résine époxy.

Bien que la valeur de rigidité diélectrique des condensateurs en Laminés 1 soit encourageante, leurs décharges partielles n'ont pas été caractérisées. Les difficultés rencontrées lors de la fabrication des condensateurs plats laissent présager de nombreux défis pour la production d'un prototype expérimental en laboratoire. Ses deux raisons ont amené notre partenaire industriel à mettre en suspens les recherches associées à cette technologie pour se concentrer sur une autre technologie de condensateur sec : l'imprégnation de PA par procédé VPI (Vacuum Pressure Impregnation).

CHAPITRE 4

ENROULEMENT CAPACITIF IMPRÉGNÉ PAR PROCÉDÉ VPI

4.1 Concept d'un condensateur imprégné par procédé VPI

Un condensateur fabriqué par procédé VPI (Vacuum Pressure Impregnation) est un condensateur imprégné dans lequel l'huile diélectrique est remplacée par une résine thermodurcissable de faible viscosité. La résine est ensuite polymérisée pour obtenir un mur diélectrique solide. L'avantage notable de ce procédé est de pouvoir fabriquer un condensateur sec à partir de parties actives déjà développées par Condis.

Dans ce chapitre, différentes bobines unitaires prélevées dans des parties actives ont été imprégnées par procédé VPI avec deux résines thermodurcissables. Les caractéristiques électriques des condensateurs imprégnés et la rigidité diélectrique des couches constituant les divers murs diélectriques ont été mesurées. Les résultats électriques ont été discutés et la qualité et les défauts d'imprégnation ont été étudiés à partir de micrographie.

Ces essais ont été réalisés en parallèle de la fabrication de prototypes et ont pour objectif de comparer les performances électriques de plusieurs configurations de bobines imprégnées.

4.2 Choix et caractérisation des résines d'imprégnation

Des résines thermodurcissables disponibles dans le commerce et utilisées pour l'imprégnation de bobines de machine tournante par procédé VPI ont été sélectionnées.

4.2.1 Résine époxy CY 192

La résine époxy CY 192 du fabricant Huntsman est une résine tricomposante obtenue à partir du mélange de la résine époxy Araldite CY 192-1 (résine époxy liquide sans solvant), du

durcisseur Aradur HY 918 (anhydride non modifié) et de l'accélérateur DY 062. Après avoir observé des fissurations dans la résine époxy CY 192, un mélange conseillé par le fabricant Huntsman et contenant une proportion de 15 PHR de plastifiant DY 040 a été utilisé. Les proportions des réactifs utilisés dans les mélanges des résines époxy CY 192 et CY 192 avec plastifiant pour toutes les fabrications VPI sont données au Tableau 4.1.

Tableau 4.1 Description des proportions des réactifs dans les mélanges de la résine époxy CY 192 et de la résine époxy CY 192 avec plastifiant DY 040
Tiré de la fiche technique de la résine époxy CY 192

Réactifs	Proportions des réactifs dans le mélange de CY 192 (PHR)	Proportions des réactifs dans le mélange de CY 192 avec plastifiant DY 040 (PHR)
Résine époxy Araldite CY 192-1	100	100
Durcisseur Aradur HY 918	100	100
Accélérateur DY 062	0,1	0,1
Plastifiant DY 040	/	15

Les propriétés diélectriques fournies dans la fiche technique et présentées au Tableau 4.2 sont celles d'un mélange de 100 PHR de résine CY 192-1 et de 100 PHR de durcisseur Aradur HY 918, sans accélérateur ni plastifiant.

Tableau 4.2 Propriétés diélectriques du mélange de 100 PHR de résine époxy Araldite CY 192-1 et de 100 PHR de durcisseur Aradur HY 918
Tiré de la fiche technique de la résine époxy CY 192

Rigidité diélectrique (kV/mm) pour 2 mm (IEC 60243-1)	57 - 83
$\tan(\delta)$ à 50 Hz à 23 °C (%) (IEC 60250)	$4 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-3}$
Permittivité à 50 Hz à 23 °C (IEC 60250)	3,5 – 3,8

Les viscosités et les temps de gel d'un mélange de 100 PHR de résine CY 192-1, de 100 PHR de durcisseur Aradur HY 918 et de 0,1 PHR d'accélérateur DY 062 sont présentés dans le Tableau 4.3. Même si la viscosité à 80 °C est supérieure d'un ordre de grandeur à la viscosité de l'huile Jarylec (2 mPa.s à 20°C), elle reste très faible pour une résine époxy. De plus, le temps de gel à 80 °C, estimé à 8 heures, laisse une large période de temps pour réaliser l'imprégnation à cette température.

Tableau 4.3 Viscosités et temps de gel estimé du mélange de résine CY 192 sans plastifiant DY 040
Tiré de la fiche technique de la résine époxy CY 192

Viscosité à 20 °C (mPa.s)	Viscosité à 80 °C (mPa.s)	Temps de gel à 80 °C (min)	Temps de gel à 120°C (min)
120	≈ 15	480	30

Le cycle de polymérisation préconisé par Huntsman est de 12 h à 120 °C. Néanmoins, un palier isotherme de 10 h à 80 °C est effectué avant ce cycle pour s'assurer que la résine est gélifiée avant d'entamer son cycle de polymérisation : cette étape permet de diminuer les contraintes internes et les porosités susceptibles d'apparaître dans un volume de résine polymérisée trop rapidement et non uniformément, et par conséquent diminuer les risques de fissuration. Le cycle de polymérisation présenté dans la Figure 4.1 est identique pour les mélanges de résine époxy avec et sans plastifiant.

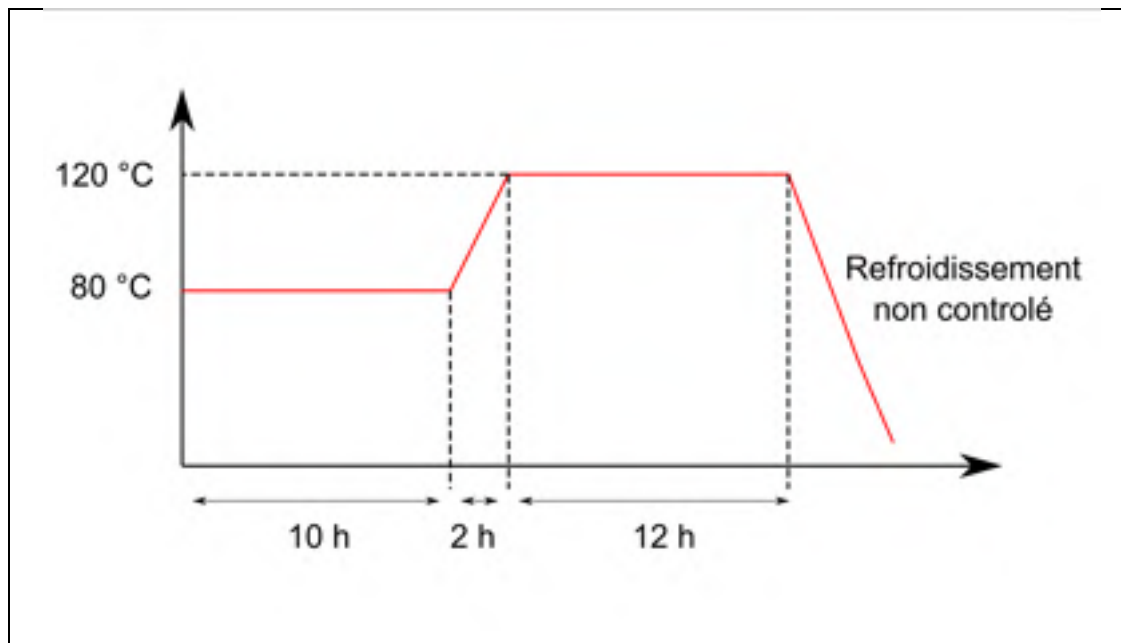


Figure 4.1 Cycle de cuisson utilisé pour les deux mélanges de résine époxy CY 192

4.2.2 Résine silicone Silres H62 C

La résine silicone Silres H62 C de Wacker est une résine mono composante, sans solvant. La résine polymérisée a une dureté Shore D de 65. Les propriétés diélectriques tirées de la fiche technique de la résine sont présentées au Tableau 4.4.

Tableau 4.4 Propriétés diélectriques de la résine silicone Silres H62 C
Tiré de la fiche technique de la résine silicone Silres H62 C

Rigidité diélectrique (kV/mm) pour 2 mm (IEC 60243-1)	27 - 82
$\tan(\delta)$ à 50 Hz à 23 °C (IEC 60250)	1×10^{-3}
Permittivité à 50 Hz à 23 °C (IEC 60250)	2,5

Les viscosités et les temps de gel du mélange de la résine sont présentés dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5 Viscosités et temps de gel de la résine silicone Silres H62 C
Tiré de la fiche technique de la résine silicone Silres H62 C

Viscosité à 25 °C (mPa.s)	Viscosité à 80 °C (mPa.s)	Temps de gel à 140 °C (min)	Temps de gel à 160°C (min)
1000	95	300	100

Le cycle de polymérisation retenu est de 32 h à 140 °C avec une montée de 2 °C/min. D'autres cycles de polymérisation, plus rapides, mais à plus haute température, pouvaient être envisagés, mais ce cycle a été retenu afin de ne pas dépasser la température de 150 °C, fixée par le partenaire industriel comme température maximale avant dégradation des propriétés des films de PPR. Comme le cycle de 140 °C est le cycle conseillé à plus basse température, aucun palier n'a été ajouté pour s'assurer que la résine soit gélifiée. À 140 °C, le temps de gel est de 300 minutes : comme l'imprégnation est effectuée à 80 °C, cette résine laisse une plage de temps suffisamment long pour pouvoir réaliser la fabrication.

4.2.3 Caractérisation de la température de transition vitreuse des résines

Une transition d'état de la résine sur la plage de température de fonctionnement du condensateur peut altérer les propriétés mécaniques et diélectriques de la résine par des phénomènes de relaxation. La fiche technique de la résine CY 192 indique que sa température de transition vitreuse est comprise entre 95 °C et 105 °C. Néanmoins, aucune information concernant l'influence du plastifiant DY 040 sur la température de transition vitreuse n'est donnée. La température de transition vitreuse de la résine silicone Silres H62 C n'est quand a-t-elle pas indiquée.

Une analyse thermique de la température de transition vitreuse a été menée sur un échantillon de résine époxy CY 192 avec plastifiant DY 040 ayant suivie un cycle de cuisson de 10 h à 80 °C puis 14 h à 120 °C sous 5 bar de pression ; et sur un échantillon de résine silicone Silres H62 C ayant suivi un cycle de 32 h à 140 °C sous 5 bar de pression. L'objectif de ces

mesures était s'assurer que la transition vitreuse des résines utilisées a lieu en dehors de la plage de températures positives de fonctionnement du condensateur, fixée de 0 °C à 80 °C. Les mesures ont été effectuées en respectant le protocole décrit à la section 2.2.2. Les analyses thermiques des deux résines sont présentées sur la plage de 0 °C à 160 °C à la Figure 4.2.

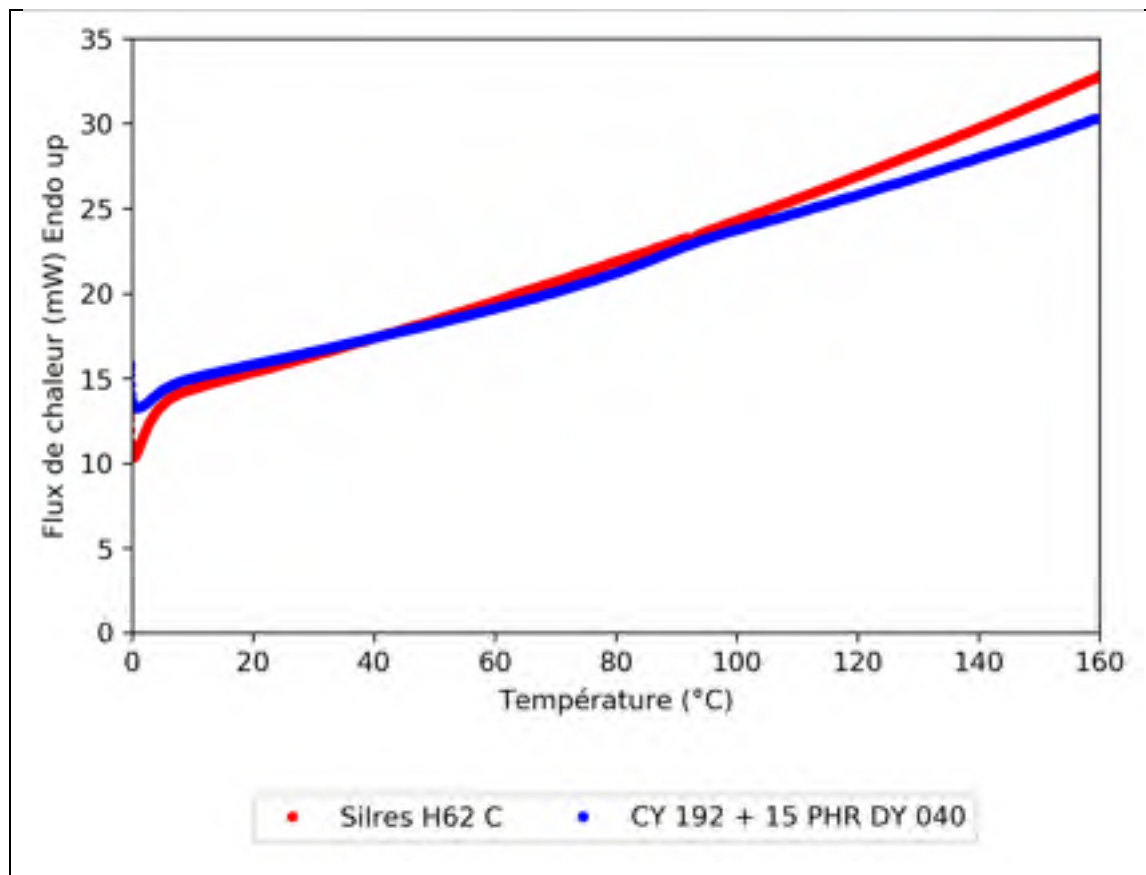


Figure 4.2 Flux de chaleur en fonction de la température (endothermique vers le haut)

On observe un palier sur la courbe de la résine CY 192 avec plastifiant entre 85 °C et 95 °C correspondant à la transition vitreuse. On peut conclure qu'il n'y aura pas de transition d'état sur la plage de température du condensateur en fonctionnement. On observe un léger pic exothermique pour la résine silicone Silres H62 C à 90 °C et aucun pic exothermique pour la résine CY 192, ce qui indique que la polymérisation des résines est complète.

4.2.4 Mesure de la rigidité diélectrique et de la permittivité des résines époxy CY 192 avec plastifiant et silicone Silres H62 C

La rigidité diélectrique de la résine époxy CY 192 avec plastifiant a été caractérisée pour vérifier si l'ajout de 15 PHR de plastifiant DY 040 a un effet sur les performances électriques de la résine CY 192, comme celui-ci n'est pas documenté dans les fiches techniques. La rigidité de la résine silicone Silres H62 C a aussi été caractérisée par la même occasion. Des plaques minces de résine de 550 μm d'épaisseur environ ont été réalisées avec un moule en aluminium. La résine CY 192 avec plastifiant a suivi un cycle de cuisson de 10 h à 80 °C puis 14 h à 120 °C à pression ambiante. La résine silicone Silres H62 C a suivi un cycle de 32 h à 140 °C à pression ambiante.

Pour chaque résine, 20 échantillons ont été prélevés sur les plaques et ont été testés dans un bain d'huile diélectrique en suivant la méthode de la section 2.2.5.1. Des échantillons sont observables à la Figure 4.3.



Figure 4.3 Échantillons prélevés sur une plaque de résine CY 192

Les diagrammes de Weibull des résultats sont présentés Figure 4.4. Les traits en pointillé représentent les intervalles de confiance à 90% et les lignes droites sont les approximations linéaires.

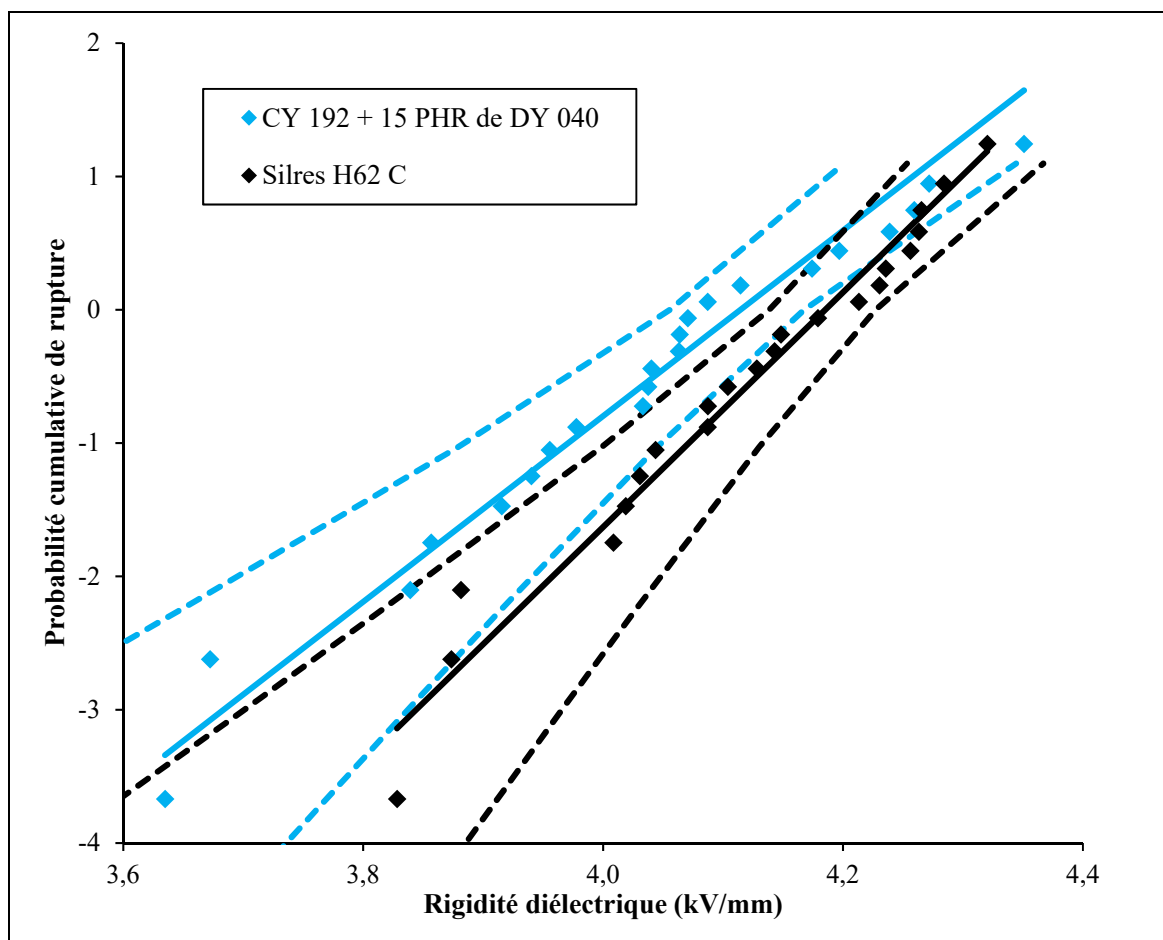


Figure 4.4 Diagramme de Weibull avec intervalles de confiance à 90% pour la résine CY 192 avec plastifiant et la résine Silres H62 C

Le Tableau 4.6 présente l'épaisseur moyenne des échantillons, leur écart type ainsi que les paramètres de Weibull approximés pour les deux résines. Les deux coefficients de corrélation sont supérieurs à la valeur seuil de 0,94 fixée par la norme pour obtenir une adéquation correcte à partir de 20 mesures. Les rigidités diélectriques des deux résines sont de même ordre de grandeur pour des épaisseurs d'échantillon semblable. On remarque que la rigidité diélectrique

mesurée de la résine CY 192 avec plastifiant, de 61,2 kV/mm, est supérieure à la valeur de la résine époxy sans plastifiant pour un échantillon de deux millimètres d'épaisseur (28,5 kV/mm à 41,5 kV/mm).

Tableau 4.6 Paramètres de Weibull de la résine CY 192 avec plastifiant et de la résine Silres H62 C					
	Épaisseur moyenne (μm)	Écart type de l'épaisseur (μm)	Facteur d'échelle α (kV/mm)	Facteur de forme β	Coefficient de corrélation
CY 192 avec plastifiant	590	48	61,2	7,0	0,99
Silres H62 C	577	34	65,7	8,8	0,98

Ce résultat était attendu au regard de l'épaisseur inférieure des échantillons testés et de la corrélation qui lie l'augmentation de la rigidité diélectrique et la diminution de l'épaisseur d'un échantillon de matériaux, observé sur d'autres matériaux diélectriques comme le polycarbonate (Couderc, David, Corlu, Fréchette, & Savoie, 2011). À la vue des écarts de rigidité diélectriques et d'épaisseur entre les échantillons de résine époxy avec plastifiant et les valeurs données pour la résine époxy sans plastifiant, ainsi que la corrélation observée des échantillons de polycarbonate testés dans les mêmes conditions, on peut supposer que l'ajout de plastifiant DY 040 n'influence pas beaucoup la rigidité diélectrique de la résine époxy CY 192.

L'épaisseur des échantillons testés étant élevée par rapport à l'épaisseur des murs diélectriques imprégnés par la résine (35,4 μm pour un mur diélectrique mixte), on peut supposer que le champ supportable par les fines couches de résine sera supérieur à la rigidité diélectrique mesurée.

Les permittivités relatives à 60 Hz des deux résines ont été mesurées par spectroscopie diélectrique sur des échantillons circulaires de 30 mm découpés avec une lame propre à partir

des plaques de résine fabriquées pour les essais de rigidité diélectrique. Elles sont présentées dans le Tableau 4.7.

Tableau 4.7 Permittivité relative des résines à 60 Hz

CY 192 avec plastifiant	3,10
Silres H62 C	2,38

4.3 Méthode de fabrication d'un condensateur par procédé VPI

4.3.1 Préparation de condensateur avant imprégnation

Les enroulements capacitifs imprégnés sont extraits d'une PA fabriquée par Condis. Contrairement au procédé VPI utilisé pour les machines tournantes, le bain de résine dans lequel la bobine est immergée pendant l'imprégnation n'est pas vidé, mais polymérise avec le condensateur pour l'encapsuler. Pour accéder aux bornes du condensateur une fois le condensateur encapsulé, des fils souples d'aluminium suffisamment long pour dépasser du moule de fabrication sont connectés sur chaque électrode à l'aide d'un adhésif haute température, comme montrée à la Figure 4.5.



Figure 4.5 Enroulement capacitif avec ses connexions avant imprégnation

Le condensateur est ensuite comprimé dans le moule d'aluminium dans lequel il sera imprégné par l'intermédiaire de deux cales d'acryliques usinées afin de reproduire la compression de $1,5 \text{ kg/cm}^2$. Le montage d'une bobine dans le moule avec les cales de compression et les fils de connexion est montré Figure 4.6. Le moule est conçu en deux parties assemblées par des boulons. Le haut de la cavité est élargi pour empêcher le débordement de la résine après avoir immergé le condensateur.

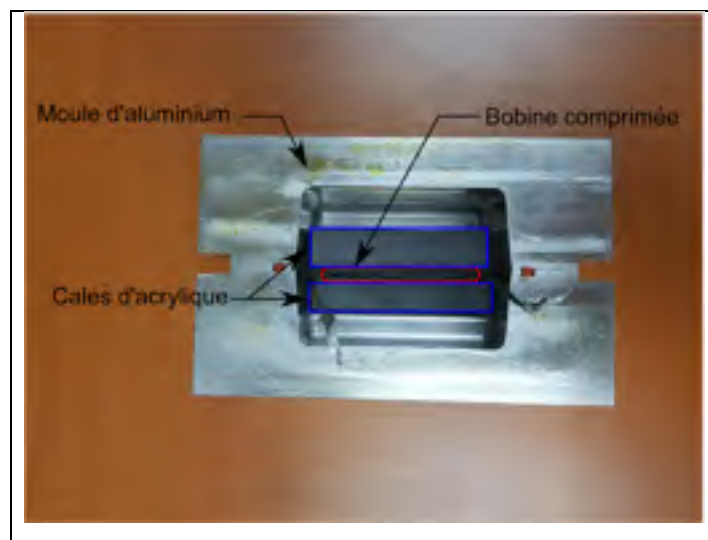


Figure 4.6 Vue de dessus du montage d'une bobine dans le moule de fabrication

L'épaisseur des cales est déterminée à partir de l'épaisseur du condensateur comprimé et des dimensions internes du moule. Un enroulement capacitif doit avoir une capacité imprégnée finale comprise entre 70 nF et 100 nF pour pouvoir être testées à $U_{\text{nominale}} = 1,5 \text{ kV}$ et $U_{\text{test}} = 4 \text{ kV}$ avec la source haute tension sans atteindre sa limite de courant. La capacité imprégnée est estimée en multipliant la valeur de la capacité de la bobine comprimée après séchage par un facteur empirique d'augmentation de capacité donné au Tableau 4.8. Ce facteur correspond à la moyenne des augmentations de capacités mesurées sur des condensateurs VPI ayant le même mur diélectrique et la même résine d'imprégnation.

Tableau 4.8 Facteur d'augmentation de capacité pour des bobines à diélectrique mixte avec les résines d'imprégnation

CY 192	CY 192 avec plastifiant	Silres H62 C
1,22	1,24	1,27

Lorsque les bobines extraites des parties actives ont une capacité imprégnée estimée dans cet intervalle, l'épaisseur de la bobine est mesurée avec un pied à coulisse directement sur la partie active encore comprimée. Néanmoins, les bobines constituant les parties actives peuvent avoir des capacités trop élevées. Elles sont alors partiellement déroulées afin de diminuer leur capacité. Dans ce cas, des essais de compression sont réalisés sur une machine de traction MTS 810 avec une cellule de charge de 2500 N afin de connaître l'épaisseur de la bobine déroulée soumise à une pression de $1,5 \text{ kg/cm}^2$. Un effort progressif de 50 N à 1000 N est appliqué sur le condensateur pendant 30 secondes. Pour chaque type de bobine, deux essais de compression sont réalisés et la moyenne est utilisée comme épaisseur du condensateur comprimé.

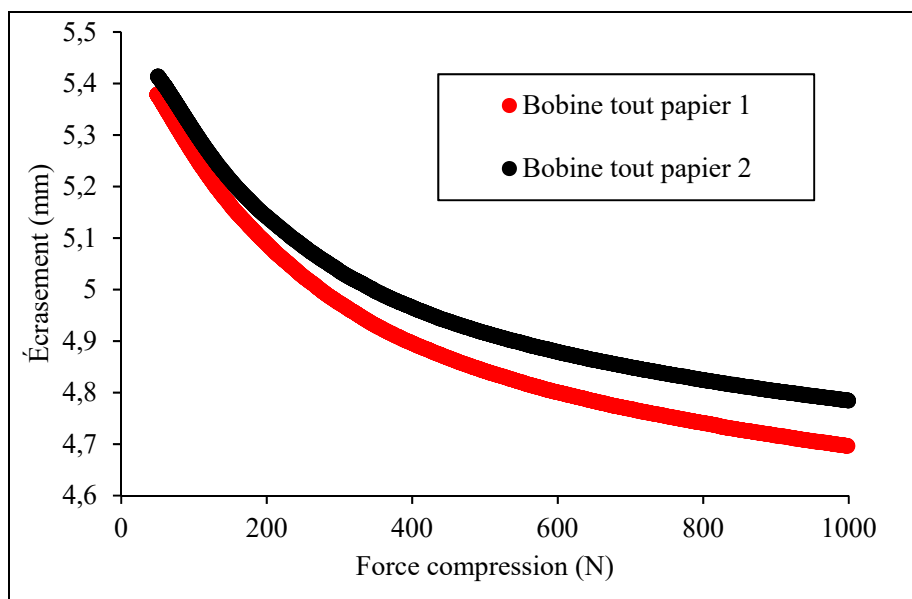


Figure 4.7 Courbes de compression pour deux bobines tout papier

La Figure 4.7 présente la variation d'épaisseur de deux enroulements capacitifs tout papier en fonction de l'effort appliqué. L'effort correspondant à la compression dans une PA est de 375 N et la moyenne des deux épaisseurs mesurées est de 4,95 mm.

On observe sur la Figure 4.7 qu'une petite variation d'épaisseur de l'enroulement capacitif entraînera une variation non négligeable de la compression. On peut supposer qu'une pression trop faible appliquée sur le condensateur facilitera la pénétration de la résine entre les couches du mur diélectrique. À l'inverse, une pression trop élevée nuira à l'imprégnation. Même si les cales sont usinées pour appliquer la même compression pour tous les condensateurs, la compression finale de la bobine n'est pas contrôlée : l'épaisseur de la bobine varie sous l'effet de la dilatation thermique des cales d'acrylique et du moule d'aluminium lors de l'imprégnation à chaud. Bien que cette variation d'épaisseur soit identique pour tous les condensateurs imprégnés, l'influence de la compression du condensateur sur la qualité de l'imprégnation n'est pas connue.

4.3.2 Montage d'imprégnation de condensateur par procédé VPI

L'imprégnation des condensateurs a été effectuée à partir d'un montage expérimental du procédé VPI. Dans ce montage, le pot de résine est placé dans la même enceinte chauffante que le condensateur afin de pouvoir être dégazé à une température contrôlée. La température n'étant régulée que par l'étuve et le montage ayant une inertie thermique importante, les étapes de dégazage, de transfert et d'imprégnation sont effectuées à la même température pour minimiser le temps de fabrication. La Figure 4.8 montre le moule et le pot de résine dans l'étuve. La résine est préparée dans un pot de verre hermétique. La pression à l'intérieur du pot est indépendante de la pression de l'étuve afin de pouvoir permettre le transfert de résine.

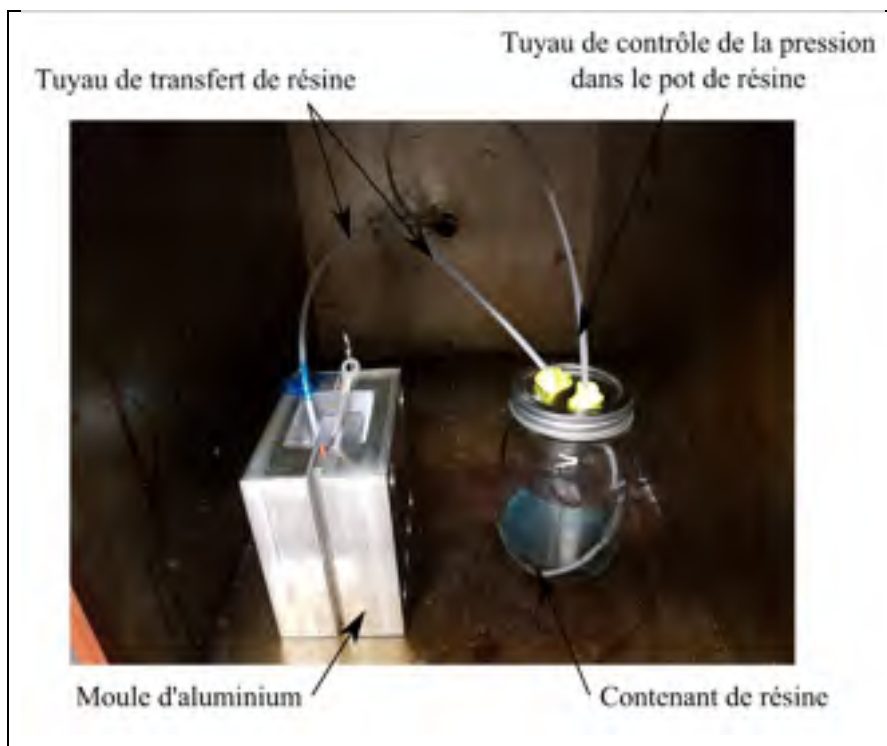


Figure 4.8 Montage de fabrication des bobines VPI à l'intérieur de l'étuve

La résine peut être mise sous vide ou à pression ambiante par l'intermédiaire d'une vanne à l'extérieure de l'étuve (Figure 4.9). Le tuyau de transfert de résine relie le moule et le pot de résine en effectuant une boucle à l'extérieure de l'étuve. Cette boucle est comprimée avec une pince réglable afin de contrôler le transfert (Figure 4.9).

La fabrication suit les étapes décrites à la section 2.3. Lors d'une fabrication, le condensateur est séché sous vide pendant au moins 24 h à 80 °C. Les différents composants constituant la résine sont mélangés en proportion dans le pot en verre à l'aide d'une spatule juste avant la fin du cycle de séchage de la bobine. La résine est ensuite dégazée pendant au moins 15 minutes. Le dégazage est réalisé sous vide et à 80°C. À 80 °C, le temps de gel des deux résines thermodurcissables permet de réaliser les autres étapes du procédé avant le durcissement de la résine. Un morceau de papier diélectrique chiffonné ou un morceau de tampon à récurer

Scotch-Brite préalablement séché sont laissés dans le pot de résine afin d'augmenter les sites de nucléation des gaz en solution lors du dégazage.



Figure 4.9 Montage de fabrication à l'arrière de l'étuve

La résine est ensuite transférée dans le moule de fabrication. Lors du transfert, le contenant de résine est ramené à pression atmosphérique alors que l'étuve est toujours sous vide. La différence de pression entre les deux chambres pousse la résine dans le tuyau de transfert. Le contrôle de l'écoulement de la résine est réalisé à l'aide de la pince réglable située à l'extérieur de l'étuve. Le transfert dure quelques minutes, afin de laisser le temps à la résine d'imprégner les différentes couches de diélectriques par capillarité. Une fois le moule rempli de résine, la pince est serrée pour arrêter le transfert.

Le condensateur imprégné est ensuite maintenu sous vide à 80 °C pendant environ 45 minutes. Enfin, le moule est transféré dans une enceinte sous pression. Cette enceinte est ensuite placée dans un four industriel Despatch. Le condensateur suit alors le cycle de polymérisation de la résine à une pression de 5 bar.

4.3.3 Description des différents condensateurs imprégnés et de leurs paramètres de fabrication

Un condensateur imprégné est défini par la composition de son mur diélectrique, la configuration de ses électrodes et sa résine d'imprégnation. Des bobines de mur diélectriques, de résine et de configuration d'électrodes différentes ont été imprégnées par procédé VPI dans le but d'identifier une composition de bobine satisfaisant les performances électriques recherchées. Les bobines étant fabriquées une par une, et leurs propriétés électriques ayant été testées directement après leur fabrication, les choix successifs de composition des bobines ont été effectué en connaissant les résultats électriques des bobines précédentes. Cette section décrit uniquement les différentes bobines imprégnées par procédé VPI. Leurs performances électriques sont détaillées plus tard dans le chapitre. Chaque enroulement capacitif imprégné par procédé VPI est nommé en suivant la forme « VPI XX », avec « XX » le numéro correspondant à son ordre chronologique de fabrication.

Des bobines à diélectrique mixte et à électrodes alignées ont été imprégnées avec la résine CY 192 (VPI 18), la résine CY 192 avec plastifiant (VPI 22) et la résine Silres H62 C (VPI 23 et VPI 25) pour comparer l'imprégnation d'un même mur diélectrique avec différentes résines. Pour rappel, les proportions des mélanges des résines époxy CY 192 sont données à la section 4.2.1.

Des condensateurs à électrode alignées à diélectrique mixte (VPI 22), tout papier (VPI 24) et tout film (VPI 28) ont été imprégnés avec la résine CY 192 avec plastifiant afin d'étudier les performances de différents murs diélectriques. Deux bobines à diélectrique mixte et électrodes alignées dont les films de PPR ont subi un traitement corona à une puissance de 2000 W

(VPI 26 et VPI 27) ont été imprégnées avec la résine CY 192 avec plastifiant. La composition des murs diélectriques est donnée au Tableau 4.9.

Tableau 4.9 Matériau et épaisseur des couches des murs diélectriques

Type de mur diélectrique	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4
Mixte	PPR (12,7 μm)	Papier (10 μm)	PPR (12,7 μm)	
Tout papier	Papier (18 μm)	Papier (18 μm)	Papier (18 μm)	Papier (18 μm)
Tout film	PPR (12,7 μm)	PPR (12,7 μm)	PPR (12,7 μm)	
Mixte corona	PPR (12,7 μm) Traité corona	Papier (10 μm)	PPR (12,7 μm) Traité corona	

Enfin, une bobine à diélectrique mixte électrodes décalées (VPI 21), et une PA formée de l'association en série de deux bobines identiques à VPI 21 connectées en série (VPI 20) ont été imprégnées en résine CY 192 avec plastifiant. La connexion en série réalisée par soudage à froid de deux électrodes d'aluminium et de leur mur diélectrique par moletage.

Ces bobines à diélectrique mixte et à électrode décalées sont identiques aux bobines utilisées dans les prototypes fabriqués. L'objectif est d'étudier si la configuration d'électrodes décalées et si les connexions moletées utilisées dans les parties actives peuvent avoir une influence sur les performances électriques d'un condensateur imprégné par procédé VPI.

Les enroulements capacitifs ont été prélevés sur différentes PA en fonction de leur configuration d'électrode et de leur mur diélectrique : les bobines n'ont donc pas toute la même longueur active, et par conséquent, pas toutes la même capacité. Le Tableau 4.10 présente les références des PA dont sont extraites les bobines imprégnées et leurs longueurs actives.

Tableau 4.10 Références et longueurs actives des condensateurs imprégnés

	Référence	Longueur active (m)
VPI 18	CDOR 2003N16 déroulée	$\approx 1,4$
VPI 20	HCI 180035-10-07	8,8
VPI 21	HCI 180035-10-07	4,4
VPI 22	CDOR 0436B10	1,72
VPI 23	CDOR 0436B10	1,72
VPI 24	CDCT format 55 unitaire déroulée	$\approx 1,05$
VPI 25	CDOR 0436B10	1,72
VPI 26	HCI 19007-11	1,81
VPI 27	HCI 19007-11	1,81
VPI 28	déroulée	$\approx 2,3$

VPI 18 dispose d'une longueur active plus courte que les autres bobines à diélectrique mixte : elle a été prélevée sur une PA à diélectrique mixte d'un condensateur fonctionnant à 180 kV. La bobine initiale avait une longueur active de 4,3 m et a été déroulée pour obtenir une longueur arbitraire de 1,4 m. VPI 24 est une bobine tout papier déroulée. VPI 28 a été obtenu après avoir déroulé une bobine tout film standard jusqu'à une longueur de 2,3 m afin d'avoir une capacité imprégnée testable. La longueur active de VPI 20 est deux fois supérieure à celle de VPI 21, car elle est composée de deux bobines connectées en série.

Le Tableau 4.11 est un récapitulatif des configurations d'électrodes, des murs diélectriques, et des résines d'imprégnation utilisées pour chaque bobine VPI. La capacité mesurée sur les condensateurs séchés avant imprégnation est aussi donnée.

Tableau 4.11 Configuration des condensateurs VPI fabriqués

	Configuration des électrodes	Mur diélectrique	Capacité mesurée avant imprégnation (nF)	Résine
VPI 18	Alignées	Mixte	52	CY 192
VPI 20	Décalées	Mixte	39,3	CY 192 avec plastifiant
VPI 21	Décalées	Mixte	80,5	CY 192 avec plastifiant
VPI 22	Alignées	Mixte	74,6	CY 192 avec plastifiant
VPI 23	Alignées	Mixte	71,2	Silres H62 C
VPI 24	Alignées	Tout papier	21,5	CY 192 avec plastifiant
VPI 25	Alignées	Mixte	65,9	Silres H62 C
VPI 26	Alignées	Mixte Corona	82,9	CY 192 avec plastifiant
VPI 27	Alignées	Mixte Corona	84,4	CY 192 avec plastifiant
VPI 28	Alignées	Tout film	49,5	CY 192 avec plastifiant

Le temps, la température et la pression appliqués pour chaque étape du procédé fabrication lors des condensateurs VPI sont donnés en ANNEXE II. À partir de la fabrication de VPI 23, l'utilisation d'une pompe à vide plus performante a permis d'atteindre la pression de $2,5 \times 10^4$ mbar lors du séchage des bobines. La Figure 4.10 a) montre la bobine VPI 18 encapsulée dans la résine époxy CY 192. Sur la Figure 4.10 b), on peut observer les masselottes de résine sur la partie supérieure du condensateur.

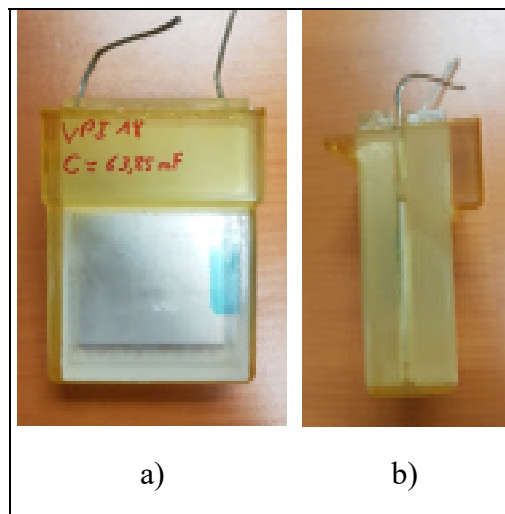


Figure 4.10 VPI 18 après démoulage
a) vu de face, b) vue de profil

4.3.4 Vaporisation du durcisseur Aradur HY 918 lors du dégazage

Une mousse composée de petites bulles se forme à la surface de la résine pendant les 15 premières minutes du dégazage de la résine CY 192 à 80 °C et 20 mbar. D'autres bulles, plus grosses, se forment le long du tube de transfert de résine et dans la structure du morceau de tampon à récurer. Ces bulles de taille importante émergent à faible fréquence et ont été observées au cours de toutes les étapes de dégazage effectuées à 80 °C et sous 20 mbar, même après 60 minutes (les temps de dégazage pour chaque imprégnation sont présentés en ANNEXE II).

Lors du dégazage de la résine à 80 °C et $2,5 \times 10^{-4}$ mbar (VPI 22), on observe l'émergence des gaz à une fréquence élevée semblable à une ébullition. Ces bulles proviennent en réalité de la vaporisation du durcisseur Aradur HY 918, dont la pression de vaporisation à 60 °C est de 0,1 mbar.

Même si la vaporisation du durcisseur déséquilibre la stœchiométrie du mélange et par la même occasion diminue le degré de polymérisation final de la résine, la fréquence d'émergence des

gaz reste faible à 20 mbar de vide et 80 °C. La majeure partie du durcisseur vaporisé reste emprisonnée sous forme de bulle dans le réseau des fibres du Scotch-Brite, et revient en solution lors du transfert à pression ambiante. La quantité de durcisseur vaporisée par rapport au volume de résine et son impact sur les propriétés diélectriques de la résine sont par conséquent jugés négligeables.

Le phénomène de vaporisation est aussi observé lors de l'imprégnation du condensateur. Il est difficile d'établir si les bulles observées résultent de l'émergence de gaz encore présents dans le mur diélectrique ou de la vaporisation du durcisseur. Différentes températures et pression de dégazage ont été testées au cours des fabrications successives afin d'identifier un couple température - pression permettant d'obtenir l'état dans lequel la viscosité est la plus faible tout en évitant le phénomène de vaporisation. L'utilisation d'un régulateur de pression lors de la fabrication de VPI 27 a permis d'identifier une température de 70 °C et une pression de 120 mbar comme couple limite avant vaporisation du durcisseur.

Un phénomène semblable à la vaporisation du durcisseur Aradur HY 918, mais de plus faible intensité est observé lors du dégazage de la résine Silres H62 C à 80 °C et 20 mbar. Néanmoins, la résine étant mono composante et sans solvant, on suppose que cette vaporisation influe uniquement la quantité de résine présente dans le pot.

4.3.5 Fissuration de la résine silicone Silres H62 C

De nombreuses fissures ont été observées dans la résine silicone de VPI 23 après son démoulage. La Figure 4.11 montre que les fissures se concentrent dans la masselotte de résine, et descendent le long de la bobine en suivant les arrêtes des cales d'acrylique. Ses fissurations ne sont pas acceptables, car elles pourraient avoir endommagé le mur diélectrique de la bobine.



Figure 4.11 Fissurations sur VPI 23

La bobine VPI 25 a été fabriquée dans les mêmes conditions que VPI 23 à la différence que les masselottes de la partie supérieure du moule d'aluminium ont été comblées avec du ruban scellant afin de limiter la présence de gros volume de résine. Aucune fissure n'a été observée sur VPI 25. Néanmoins, les fissures observées sur VPI 23 laissent présager que des fissures similaires pourraient être constatées dans le volume d'un prototype imprégné en silicone. Aucune fissure n'a été observée sur les bobines VPI fabriquées en résine époxy CY 192.

4.4 Essais électriques

Les caractéristiques électriques des enroulements capacitifs imprégnés, détaillées dans le Tableau 4.12, sont déterminées à partir des caractéristiques attendues d'un prototype sec formé de 10 bobines en série et décrit à la section 2.1.2.

Tableau 4.12 Caractéristiques électriques attendues pour une bobine VPI

Tension AC nominale V_{nominale} (kV)	1,5
Tension AC test V_{test} (kV)	4
Fréquence d'opération (Hz)	60
$\tan(\delta)$	$< 20 \times 10^{-4}$
Décharges partielles (pC) à V_{nominale} pendant 60 s	< 5
Rigidité diélectrique équivalente de l'isolant (kV/mm)	> 112

4.4.1 Spectroscopie diélectrique

La capacité et la tangente de l'angle de tangente de perte des bobines VPI sont caractérisées par spectroscopie diélectrique, en suivant le protocole de mesure décrit à la section 2.2.3. Les capacités et $\tan(\delta)$ des bobines VPI sur la plage de 1 Hz à 10^3 Hz sont présentées à la Figure 4.12. Les résultats à plus haute fréquence ne sont pas présentés, car la fréquence cible est de 50 Hz ou de 60 Hz.

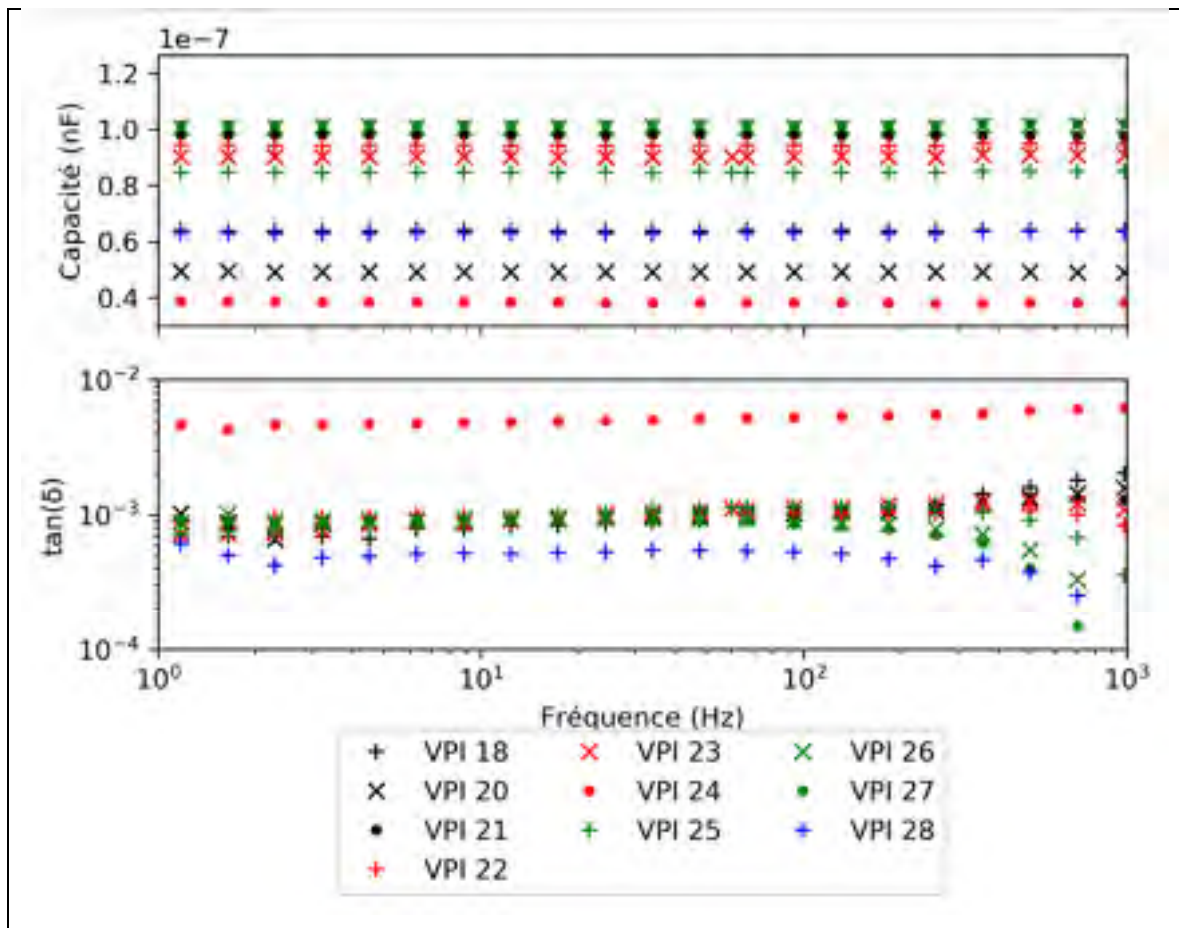


Figure 4.12 Capacité et $\tan(\delta)$ des bobines VPI de 1 Hz à 10^3 Hz

Le condensateur tout papier (VPI 24) est le seul à avoir un facteur $\tan(\delta)$ supérieur au seuil fixé dans le cahier des charges. Quelle que soit la résine d'imprégnation, les bobines à

diélectriques mixte et tout film ont une tangente de l'angle de perte inférieure à 2×10^{-3} à 60 Hz. Comme on pouvait l'attendre, la configuration des électrodes n'ayant pas d'influence sur les caractéristiques du mur diélectrique, elle n'en a pas non plus sur le facteur $\tan(\delta)$.

À l'inverse, le traitement corona altère la surface du PPR et on pouvait supposer que la tangente de l'angle de perte en soit impactée. Néanmoins, on n'observe aucun changement de facteurs de pertes pour les deux condensateurs dont les films ont été traités corona.

On constate une diminution du facteur $\tan(\delta)$ à partir de 200 Hz pour VPI 26 et VPI 27 et à partir de 400 Hz pour VPI 25. Les condensateurs VPI étant des condensateurs bobinés, ils disposent d'un comportement capacitif et d'un comportement inductif. La chute du facteur $\tan(\delta)$ lorsque la fréquence augmente représente le basculement du comportement capacitif vers le comportement inductif de la bobine VPI.

Tableau 4.13 Capacité des bobines VPI à 60 Hz et augmentation de leur capacité

	Capacité mesurée avant imprégnation (nF)	Capacité (nF)	Augmentation de capacité (%)
VPI 18	52	64,0	23
VPI 20	39,3	49,1	25
VPI 21	80,5	98,1	22
VPI 22	74,6	94,4	27
VPI 23	71,2	90,3	27
VPI 24	21,5	38,2	78
VPI 25	65,9	84,7	28
VPI 26	82,9	100,9	22
VPI 27	84,4	101,6	20
VPI 28	49,5	63,1	27

Les capacités à 60 Hz et l'augmentation de capacité après imprégnation sont présentées au Tableau 4.13. L'augmentation de capacité après imprégnation pour les bobines à diélectrique mixte et tout film oscille entre 22% et 28%, quelle que soit la résine d'imprégnation utilisée.

On constate que l'augmentation de capacité de la bobine tout papier est le triple de la prise de capacité des bobines à diélectrique mixte. Cette forte augmentation s'explique par le fait que le mur diélectrique du condensateur est principalement constitué d'air. L'imprégnation du papier par la résine époxy, qui possède une permittivité trois fois supérieure à celle de l'air, a une influence considérable sur la permittivité totale du mur diélectrique après imprégnation, ce qui explique la forte augmentation de capacité. Dans le cas d'un condensateur à diélectrique mixte, la permittivité globale du mur diélectrique correspond pour une grande partie à la permittivité des films de PPR. Les films de PPR donnent donc une stabilité à la permittivité du mur diélectrique mixte, limitant ainsi l'augmentation de la capacité suite à l'imprégnation.

4.4.2 Mesure et analyse des décharges partielles

Les DP ont été mesurées sur les condensateurs imprégnés soumis à une tension de 1,5 kV. Lors des mesures, les bobines VPI sont connectées en parallèle avec le condensateur de mesure, et en série avec un pont diviseur de tension de 50 k Ω . Le montage et le protocole de mesure sont présentés dans la section 2.2.4. La mesure est réalisée pendant 60 secondes, avec une période de référence t_{Ref} de 10 secondes.

Les histogrammes de décharges partielles de VPI 22, VPI 28, VPI 24, VPI 26 et VPI 27 sont présentés respectivement aux Figure 4.13, Figure 4.14, Figure 4.15, Figure 4.16 et Figure 4.17. Une période du signal de tension est représentée par la courbe sinusoïdale verte et les événements de décharges sont positionnés dans l'histogramme par rapport à sa phase. Les statistiques affichées dans la colonne de droite de chaque histogramme correspondent aux statistiques calculées pour la dernière période de référence, soit les 10 dernières secondes de mesure. Elles peuvent être comparées, mais ne sont pas représentatives de la totalité des DP

mesurées. On préférera donc analyser les niveaux de DP à partir des histogrammes de décharge. Les histogrammes de décharges partielles de VPI 18, VPI 20, VPI 21, VPI 23 et VPI 25 sont analogues à l'histogramme de VPI 22 et sont présentés en ANNEXE III.

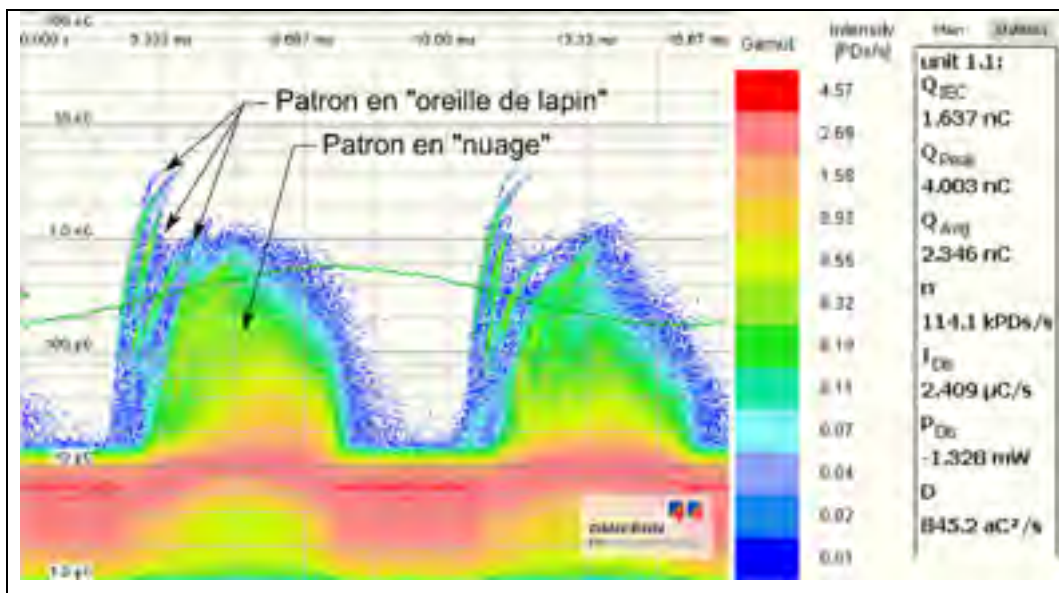


Figure 4.13 Mesures de décharges partielles de VPI 22 à $U_{\text{nominale}} = 1,5 \text{ kV}$
Le bruit de fond du montage avant mesure est inférieur à 6 pC

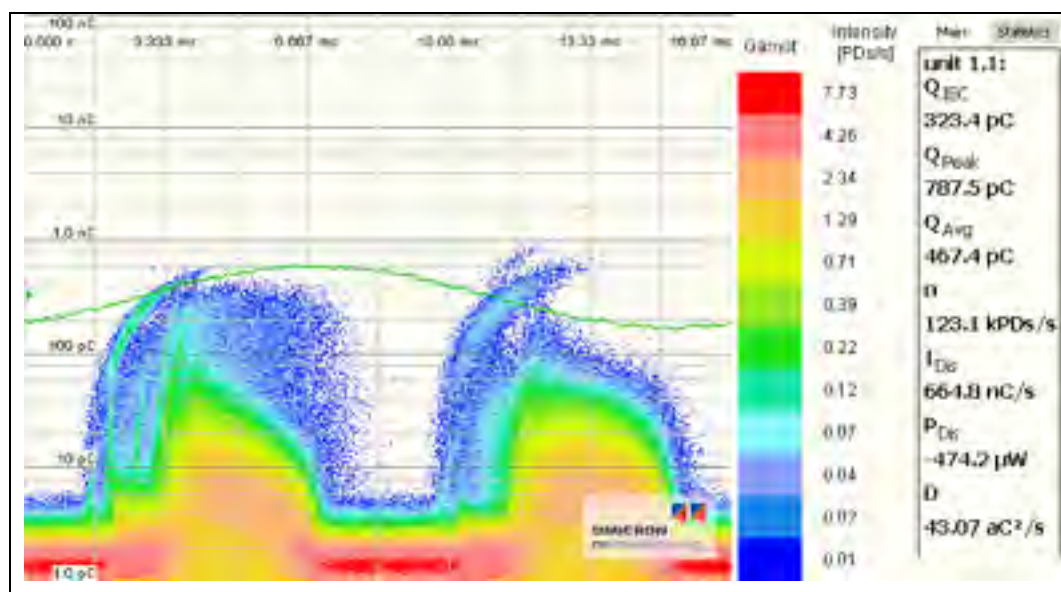


Figure 4.14 Mesures de décharges partielles de VPI 28 à $U = 1,6$ kV
Le bruit de fond du montage avant mesure est inférieur à 7 pC

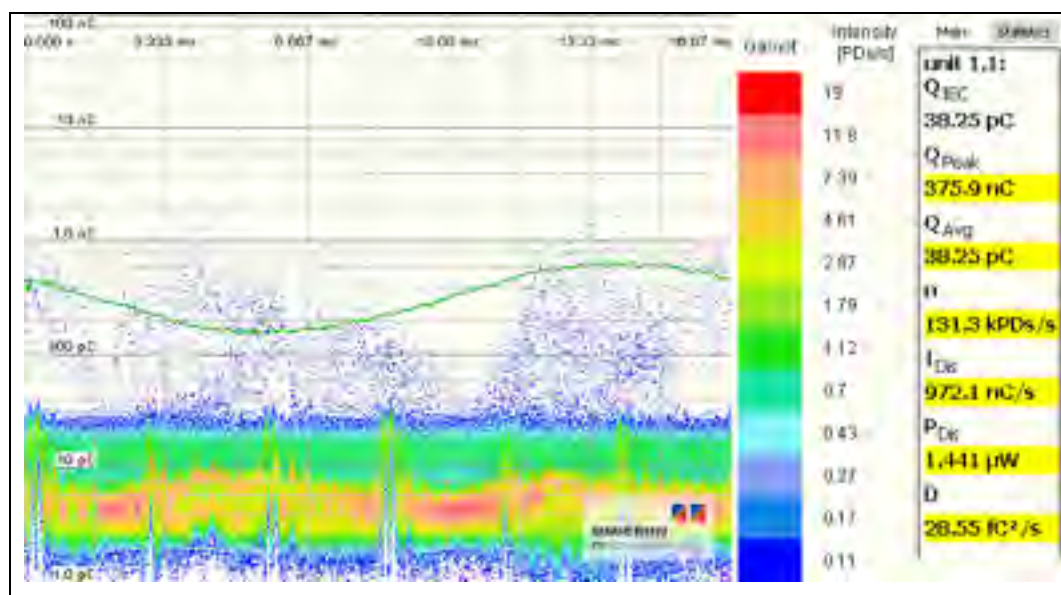


Figure 4.15 Mesures de décharges partielles de VPI 24 à $U_{nominale} = 1,5$ kV avant claquage. Le bruit de fond du montage avant mesure est inférieur à 11 pC.

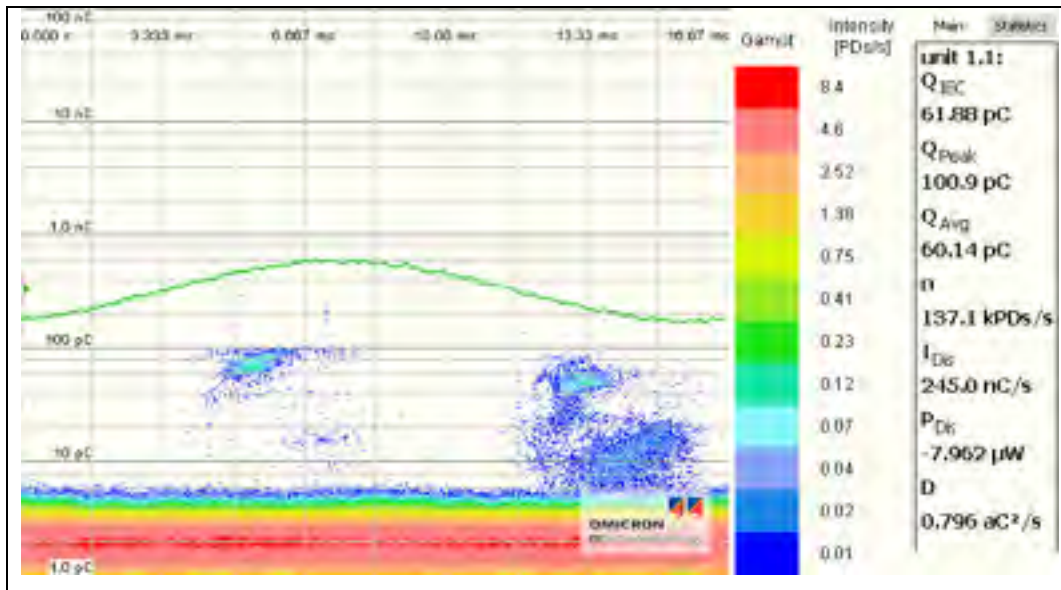


Figure 4.16 Mesures de décharges partielles de VPI 26 à $U_{nominale} = 1,5$ kV
Le bruit de fond du montage avant mesure est inférieur à 8 pC

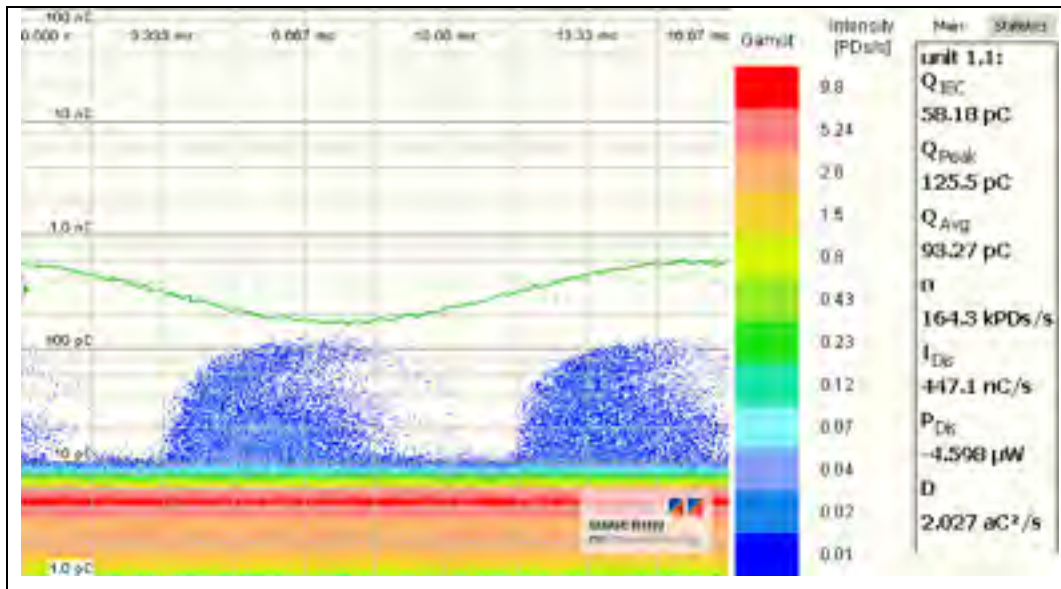


Figure 4.17 Mesures de décharges partielles de VPI 27 à $U_{nominale} = 1,5$ kV
Le bruit de fond du montage avant mesure est inférieur à 10 pC

VPI 22 et ses condensateurs analogues présentent des DP d'intensité élevée, de l'ordre de plusieurs nanocoulombs. On distingue deux patrons de DP sur l'histogramme de VPI 22 (Figure 4.13). Le premier patron est formé d'un nuage dense d'événement, observable sur les phases positive et négative. Les décharges apparaissent en avance de phase par rapport au maximum de tension et leur intensité croît jusqu'à la moitié de la montée en tension. Une fois le maximum de tension atteint, l'intensité des DP diminue progressivement jusqu'à la tension d'extinction, située peu après le maximum de tension. Plus on se rapproche du centre du nuage et plus les événements de décharges partielles sont plus nombreux. Le second patron est délimité par des événements de décharges partielles de forte intensité, dessinant une forme incurvée orientée en direction du maximum de tension. Ce type de patron de décharge que l'on nommera « oreille de lapin » est visible aux changements de polarité des deux phases. VPI 28 (Figure 4.14) présente les deux patrons similaires à ceux observés sur l'histogramme de VPI 22.

L'histogramme de VPI 24 (Figure 4.15) affiche des décharges partielles de l'ordre de plusieurs centaines de picocoulombs, pouvant dépasser le nanocoulomb en intensité. Aucun patron de DP ne semble se dessiner : les événements sont dispersés tant en intensité qu'en position dans la phase de tension. La récurrence des événements est de l'ordre de 0,1 DP/s environ.

L'histogramme de VPI 26 (Figure 4.16) présente deux faciès de DP. Le premier patron est un petit nuage d'événements d'intensité inférieure à 100 pC et dont la récurrence des décharges est de l'ordre de 0,07 DP/s. Ce faciès est visible en avance de phase par rapport au maximum de tension. La tension d'extinction des DP est supérieure à la tension d'apparition, et le patron est observable pour les deux polarités. Le second patron est un nuage de décharges partielles en avance de phase par rapport au maximum de tension. L'intensité des décharges croît avec l'augmentation de tension, et la tension d'extinction des décharges partielles correspond au maximum de tension. Ce défaut ne semble pas être symétrique sur VPI 26 même si quelques événements de DP sont visibles sur la polarité positive.

Néanmoins, un patron de décharges partielles similaire à celui-ci et symétrique est observable sur l'histogramme de VPI 27 (Figure 4.17). Un patron en forme « d'oreille de lapin » pourrait aussi se distinguer sur VPI 27 même si ses décharges n'ont pas lieu au changement de polarité : elles débutent un peu après et s'arrêtent au maximum de tension. Ses décharges correspondent mieux à un patron en forme de nuage observé dans VPI 22 plutôt qu'à des décharges de type « oreille de lapin ».

Les décharges en forme « d'oreille de lapin » observées uniquement dans les condensateurs à diélectrique mixte et tout film non traités corona laissent penser que ses décharges ont lieu dans des cavités issues de délaminations causées par la mauvaise adhésion entre le PPR et la résine époxy (Discussions autour du Partial Discharge Expert System, Condis, 2019). Cette hypothèse semble être confirmée avec l'histogramme de la bobine tout papier (VPI 24), qui ne dispose pas de film de PPR et ne présente pas de patrons de décharge en « oreille de lapin ».

Le patron en forme de nuage est observable dans les condensateurs à diélectrique mixte et tout film. Ce faciès de décharge est similaire au cas de DP interne dans des cavités multiples décrit par Natrass (1988) et ses condensateurs semblent donc avoir ce type de défaut. On remarque que l'intensité moyenne des décharges composant le nuage est plus faible pour le condensateur tout film que pour les condensateurs à diélectrique mixte, et elle diminue d'un ordre de grandeur dans le cas d'un condensateur dont les films PPR ont été traités corona.

En comparant l'histogramme de VPI 24 avec l'histogramme de VPI 22, on constate que le condensateur tout papier présente de nombreuses décharges partielles d'intensité variables, mais très diffusent, analogue au cas de cavités multiples. Cette observation confirme que le papier pourrait ne pas être correctement imprégné, quel que soit le type de résine utilisée. Néanmoins, l'histogramme de VPI 28 montre que le papier n'est pas la seule source des décharges observées dans le « patron » en nuage.

Une seconde source qui pourrait être à l'origine des DP telles qu'observées dans le « nuage » du condensateur tout film est que la rigidité diélectrique des fines pellicules de résine situées entre les couches constituant le mur diélectrique est atteinte à la tension de mesure. Des DP pourraient être générées dans le mur diélectrique suite à la brûlure de la résine époxy, sans toutefois engendrer le claquage du mur diélectrique dont la performance est maintenue par la présence des films de PPR. Cette hypothèse sera étudiée avec un modèle éléments finis à la section 6.4.

Ce phénomène serait alors amplifié dans les zones de concentration de champ, notamment en bordure d'électrodes. Pour le moment, un niveau de décharges partielles similaires est relevé dans les condensateurs à électrodes alignées et les condensateurs à électrodes décalées. Néanmoins, cette observation ne réfute pas l'hypothèse du claquage local de la résine époxy, car les décharges causées par les délaminations ont une intensité plus importante.

Enfin, aucune différence notable de DP n'est observée entre les bobines VPI 20 et VPI 21. La liaison moletée n'apparaît pas comme une origine probable de DP.

Le traitement corona des films de PPR est une solution efficace pour diminuer les décharges partielles dans les condensateurs à diélectrique mixte, sans toutefois les éliminer totalement. Une mauvaise imprégnation du papier par la résine menant à l'apparition de décharges partielles pourrait expliquer l'origine d'une partie des décharges observées dans les histogrammes de VPI 26 et VPI 27. Une autre hypothèse concernant le claquage local de la résine époxy dans les zones de concentration de champ pourrait être la cause d'une partie des décharges partielles observées.

4.4.3 Essai de claquage des condensateurs VPI

Des essais de claquage ont été réalisés sur les bobines VPI à partir du montage décrit à la section 2.2.5.3, en conservant le système d'acquisition des DP. Toutes les bobines ont été

soumises à une rampe de tension cible jusqu'à 15 kV. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 4.14. La limite d'intensité de la source a été atteinte avant le claquage des bobines VPI 22, VPI 26 et VPI 27. Pour ces condensateurs, la rigidité diélectrique a été calculée à partir des valeurs de tension atteinte avant mise en défaut de la source.

Les bobines tout film et les bobines à diélectrique mixte ont une rigidité diélectrique très proche. Cela peut s'expliquer par le fait que lorsque le champ électrostatique généré dans le mur diélectrique atteint la valeur de la rigidité diélectrique du PPR, entraînant ainsi le claquage d'un film, la présence d'une ou deux films supplémentaires de PPR dans le mur diélectrique ont peu d'influence sur sa résistance au claquage.

Tableau 4.14 Tension de claquage, épaisseur de diélectrique et rigidité diélectrique des bobines imprégnées

	Épaisseur théorique du mur diélectrique (μm)	Tension de claquage (kV)	Rigidité diélectrique (kV/mm)
VPI 18	35,4	4,48	126,6
VPI 20	35,4	4,2	118,6
VPI 21	35,4	8,4	118,6
VPI 22	35,4	Non claqué à 4,5	> 127,1
VPI 23	35,4	4,24	119,8
VPI 24	72	1,5	20,8
VPI 25	35,4	3,68	104,0
VPI 26	35,4	Non claqué à 4,2	> 118,6
VPI 27	35,4	Non claqué à 4,2	> 118,6
VPI 28	38,1	4,57	119,9

Tous les condensateurs à diélectrique mixte à l'exception de VPI 25 présentent des rigidités diélectriques supérieures à la rigidité de 112 kV/mm atteint par la technologie imprégnée

d'huile diélectrique. On remarque que VPI 25 a une tension de claquage inférieure à celle de VPI 23 alors que la résine silicone de ce dernier est fissurée. VPI 24 a été claqué au cours de la mesure de décharges partielles à la tension de 1,5 kV et sa rigidité diélectrique est bien inférieure à la rigidité diélectrique attendue pour une bobine tout papier similaire imprégnée d'huile Jarylec (55 kV/mm). La Figure 4.18 montre que le claquage s'est produit en bordure d'électrode, dans une région où un plissement de l'électrode est observable.

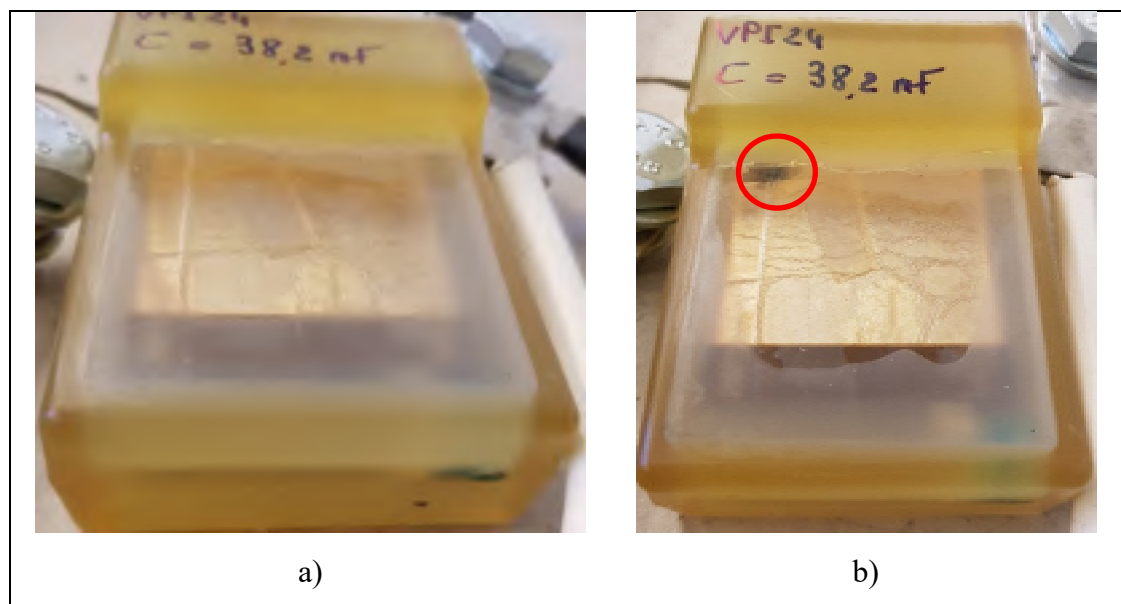


Figure 4.18 VPI 24 (a) avant claquage et (b) après claquage. Le cercle rouge indique le lieu du claquage

La valeur obtenue lors du claquage de VPI 24 est très éloignée de la rigidité diélectrique de 272 kV/mm mesurée pour le papier imprégné de résine époxy sans plastifiant à une épaisseur de 15 μm . Cet écart peut s'expliquer par la concentration de champ en bordure d'électrode et par le risque plus élevé de défaut géométrique dans le volume d'un condensateur imprégné. Le plissement de l'électrode, même s'il est observable dans la majorité des bobines imprégnées jusqu'ici peut avoir contribué à une rupture précoce de VPI 24. Ce type de défaut doit jouer un rôle moins déterminant dans le cas d'un enroulement à diélectrique mixte qui résiste mieux en raison de la présence des films de PPR, dont la rigidité diélectrique est plus élevée.

La comparaison des valeurs de VPI 23 et VPI 25 rappellent qu'il est difficile de conclure sur la validité des performances en claquage observées à partir d'un unique exemplaire de condensateur imprégné. Les résultats de VPI 24 indiquent aussi qu'un défaut sur une électrode ou dans un mur diélectrique peut représenter une faiblesse dans le condensateur et diminuer grandement sa tension de claquage.

Les résultats semblent indiquer que la rigidité diélectrique des bobines à électrodes alignées est légèrement supérieure à celle des bobines à électrodes décalées. Bien que VPI 18 et VPI 28 aient claqué à une tension proche de la tension de claquage des condensateurs à électrodes décalées, les bobines à électrodes alignées imprégnées avec de la résine époxy CY 192 avec plastifiant n'ont pas pu être claquées et aucune conclusion formelle ne peut être tirée. Une concentration de champ en bordure des électrodes induites par le décalage des électrodes pourrait être la cause d'un claquage précoce, mais cette hypothèse reste à être étudiée.

4.4.4 Étude de la rigidité diélectrique du polypropylène et du papier imprégné de résine époxy CY 192 sans plastifiant

Les rigidités diélectriques du papier imprégné de résine époxy CY 192 sans plastifiant et du PPR ont été caractérisées afin de mieux connaître les propriétés des différentes couches isolantes des condensateurs VPI. Les échantillons de papiers imprégnés et de PPR sont pelés à partir d'une coupe faite dans une PA imprégnée de résine époxy CY 192 sans plastifiant (prototype 10) polymérisée sous 5 bar lors d'un cycle de 10 h à 80 °C et 14 h à 120 °C.

Pour chaque matériau, 20 échantillons ont été prélevés sur les plaques et testés dans un bain d'huile diélectrique en suivant la méthode de la section 2.2.5.1. Les diagrammes de Weibull sont montrés à la Figure 4.19. Les traits en pointillé représentent les intervalles de confiance à 90% et les lignes droites sont les approximations linéaires.

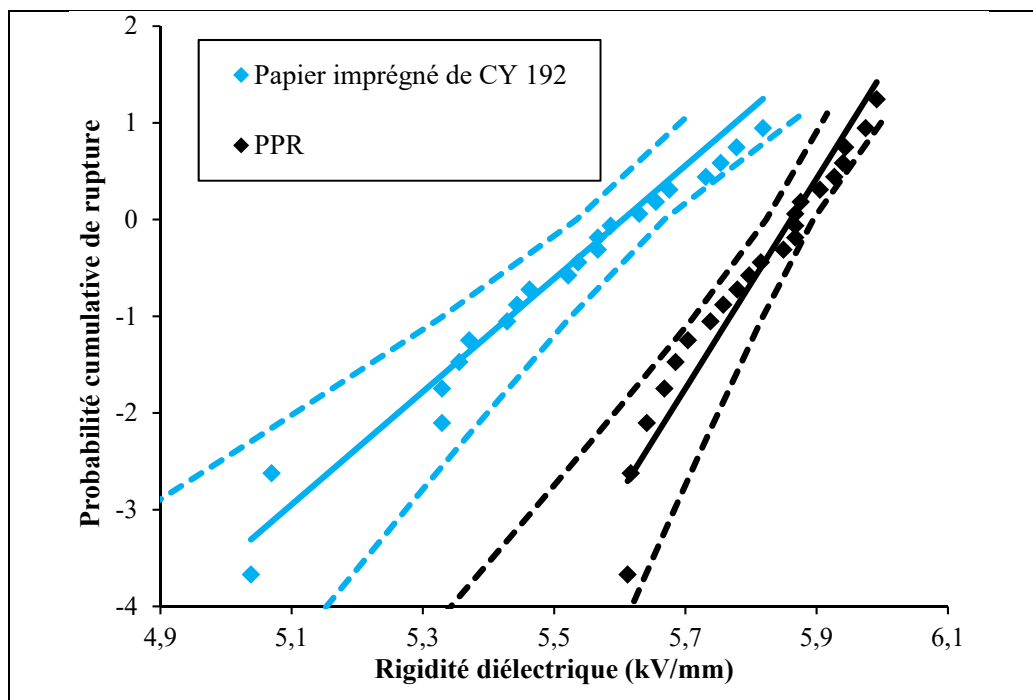


Figure 4.19 Diagramme de Weibull avec intervalles de confiance à 90% pour du papier imprégné par la résine époxy CY 192 sans plastifiant et pour du PPR

Le Tableau 4.15 présente l'épaisseur moyenne des échantillons, leur écart type ainsi que les paramètres de Weibull approximés pour le papier imprégné et le PPR.

Tableau 4.15 Paramètres de Weibull du papier imprégné par la résine époxy CY 192

	Épaisseur moyenne (μm)	Écart type de l'épaisseur (μm)	Facteur d'échelle α (kV/mm)	Facteur de forme β	Coefficient de corrélation
Papier imprégné de CY 192 sans plastifiant	15	3	272	5,8	0,98
PPR	17	2	351	10,9	0,96

Les mesures et la distribution du papier et du PPR imprégnés de résine époxy CY 192 sans plastifiant ont une bonne adéquation. La rigidité diélectrique du papier imprégné est de

272 kV/mm. On constate que la rigidité diélectrique d'un papier mince imprégné de résine époxy sans plastifiant de 15 μm est nettement supérieure à celle de la résine époxy avec plastifiant de 550 μm , mesurée à la section 4.2.4. En revanche, la rigidité diélectrique mesurée pour le PPR imprégnée de résine époxy CY 192 sans plastifiant est faible par rapport aux valeurs relevées dans la littérature pour un film de BOPP (plus de 700 kV/mm, section 1.5.2).

Des mesures de rigidités diélectriques effectuées par Condis sur des échantillons de papier et de PPR sont présentées dans le Tableau 4.16. Ces mesures permettent d'effectuer une comparaison entre les matériaux imprégnés d'huile synthétique Jarylec et ceux imprégnés de résine époxy.

Tableau 4.16 Rigidités diélectriques du papier et du PPR sec puis imprégnés d'huile diélectrique Jarylec

Matériau	Épaisseur (μm)	Rigidité diélectrique (kV/mm)
Papier sec	10	72,7
Papier imprégné d'huile Jarylec	10	131,5
PPR sec	12,7	474,9
PPR imprégné d'huile Jarylec	12,7	331,7

On remarque que la rigidité diélectrique mesurée pour un papier imprégné de résine époxy de 15 μm est supérieure à la rigidité diélectrique du papier imprégné d'huile Jarylec.

En revanche, la rigidité diélectrique des films de PPR imprégnés d'époxy est plus faible que la rigidité diélectrique du PPR non imprégné. En réalité, les échantillons de PPR imprégné de résine ont une épaisseur un peu plus grande que les échantillons de PPR sec testés ce qui pourrait expliquer cet écart. Le film de PPR subit probablement un vieillissement lors du cycle de polymérisation de la résine et son influence sur la rigidité diélectrique n'a pas été évalué.

Bien qu'une augmentation du pourcentage de cristallinité du film de PPR pourrait augmenter sa rigidité diélectrique (Gao et al., 1990), le maintien du PPR à la température de polymérisation de la résine, proche ou inférieure à sa température de fusion, pourrait aussi le dégrader. Néanmoins, la morphologie du PPR après imprégnation n'est pas un facteur déterminant à ce stade de développement et n'a donc pas été étudiée dans ce mémoire mais elle devra être caractérisée pour la suite du projet.

La valeur de rigidité diélectrique du film de PPR de 12,7 μm imprégné de résine époxy est donc comprise entre la valeur du PPR sec et celle mesurée pour le PPR imprégné de 15 μm .

4.5 Observation de l'imprégnation des murs diélectriques en résine époxy CY 192 avec plastifiant

Des observations d'échantillons prélevés sur des condensateurs VPI imprégnés de résine époxy CY 192 avec plastifiant ont été réalisées au microscope optique à transmission LEICA XG51 et au microscope optique à confocal Olympus LEXT4100 afin d'inspecter la qualité de l'imprégnation des murs diélectriques. Des pellicules de papier imprégnées par de la résine époxy CY 192 sans plastifiant ont aussi été observées.

Les échantillons sont découpés avec une tronçonneuse à disque abrasif et les surfaces d'observation sont polies à l'eau par la séquence de papiers de grains abrasifs de taille 120, 240, 400, 600 et 800. Le polissage a été effectué sur une table de polissage métallographique rotative à une vitesse de 300 tours par minutes.

4.5.1 Observation du mouillage du papier par la résine époxy CY 192

Du papier imprégné de résine époxy a été observé afin de vérifier l'hypothèse indiquant que les DP constatées dans la bobine tout papier et les bobines à diélectrique mixte traitées corona seraient causées par une mauvaise imprégnation.

Des pellicules de papier imprégné de résine époxy CY 192 sans plastifiant (prélevés sur le prototype 10) ont été observées au microscope optique par réflexion à des grossissements de 100X et 500X (Figure 4.21) et comparées à un film de PPR non imprégné (Figure 4.20). Il est à noter que les couches de PPR se sont séparées de l'électrode d'aluminium et du papier très facilement lors du prélèvement. Cette observation conforte l'hypothèse de délaminations pouvant être créée par la mauvaise adhésion entre le film de PPR et la résine d'imprégnation.

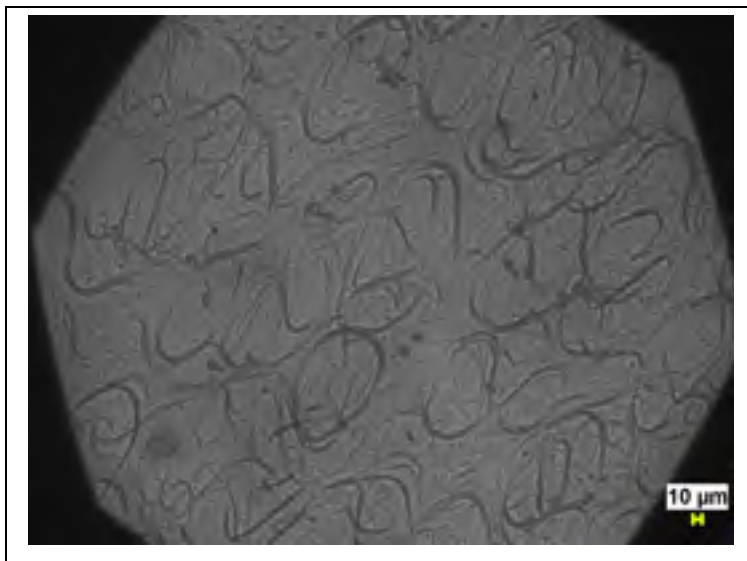


Figure 4.20 PPR non imprégné à un grossissement de 100X

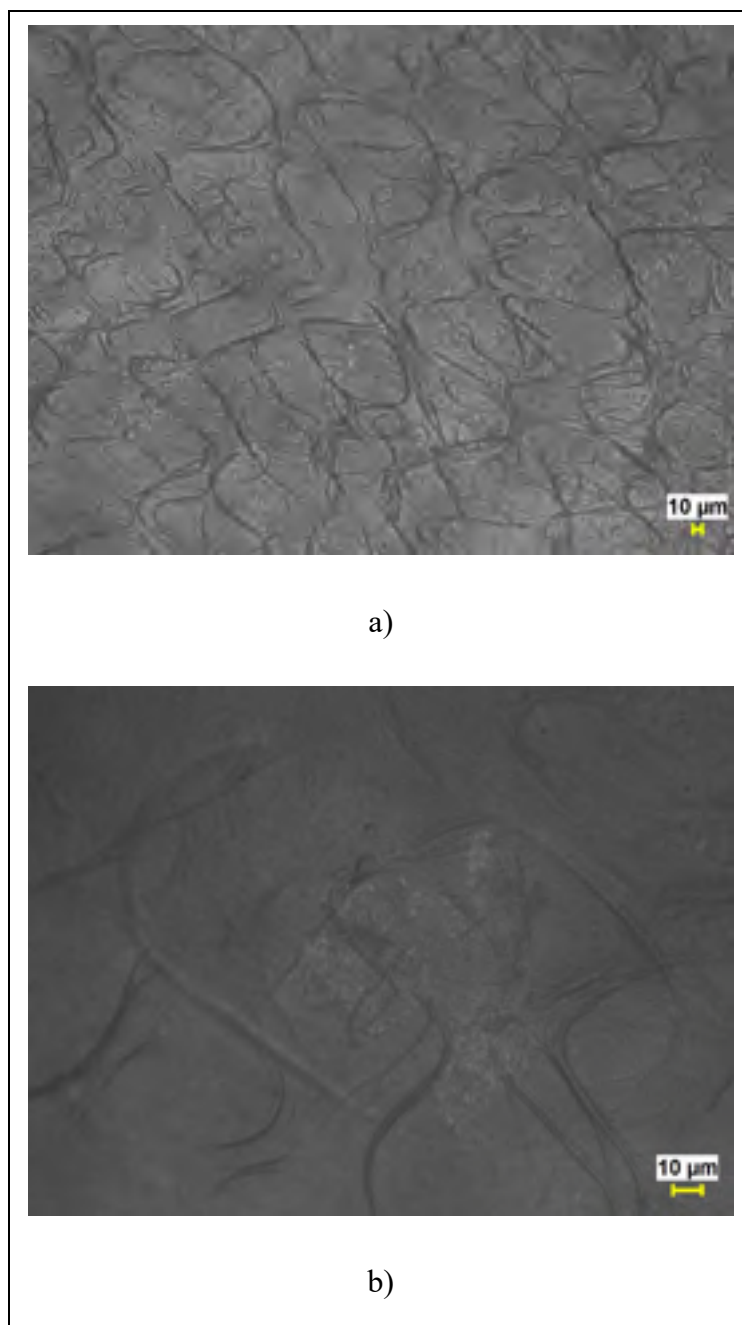


Figure 4.21 Papier imprégné de résine époxy CY 192 :
a) à un grossissement de 100X et b) à un grossissement
de 500 X

On observe des stries apparentes sur toute la surface du papier imprégné. En réalité, on retrouve ces marques sur le film de PP avant imprégnation : ces stries sont les empreintes des aspérités rugueuses du PPR laissées sur la surface de la résine époxy imprégnant le papier.

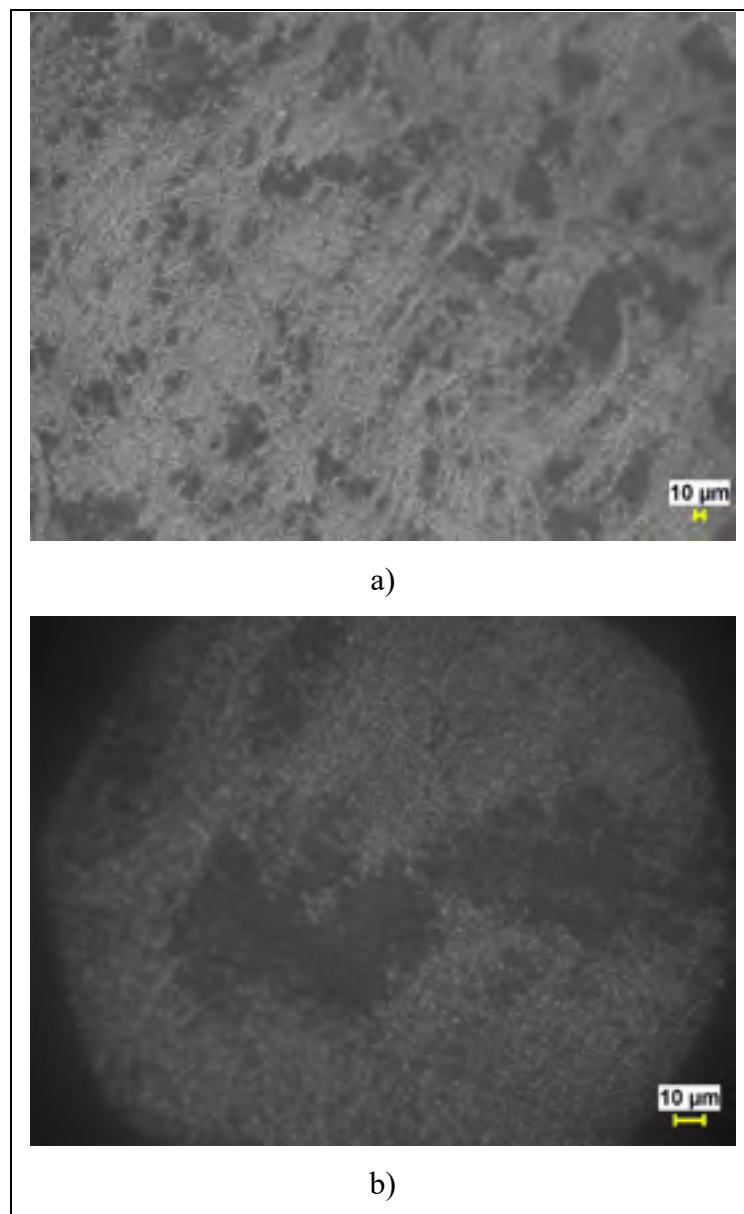


Figure 4.22 Papier non imprégné a) à un grossissement de 100X et b) à un grossissement de 500 X

Du papier non imprégné a aussi été observé non imprégné au microscope optique par réflexion à des grossissements de 100X et 500X (Figure 4.22). Le papier est constitué d'un enchevêtrement irrégulier de fibres. Le papier est caractérisé par la présence de zone presque vide (régions sombres), mais l'image à 500X montre aussi que l'espace occupé par les fibres est peu dense. Le papier imprégné a un aspect plus homogène et les porosités du papier semblent avoir été comblées par la résine lors de l'imprégnation. La comparaison entre le papier non imprégné et le papier imprégné, ainsi que le film de PPR suggère que la qualité de l'imprégnation du papier est adéquate et produit un film possiblement aussi uniforme que le polypropylène.

Une coupe transversale (perpendiculaire à l'axe de la bobine) a été effectuée dans VPI 24 (bobine tout papier imprégnées de résine époxy CY 192 avec plastifiant) puis ont été observée au microscope optique à confocal (Figure 4.23) à des grossissements de 200X et 500X. On peut distinguer les 4 couches de papier composant le mur diélectrique.

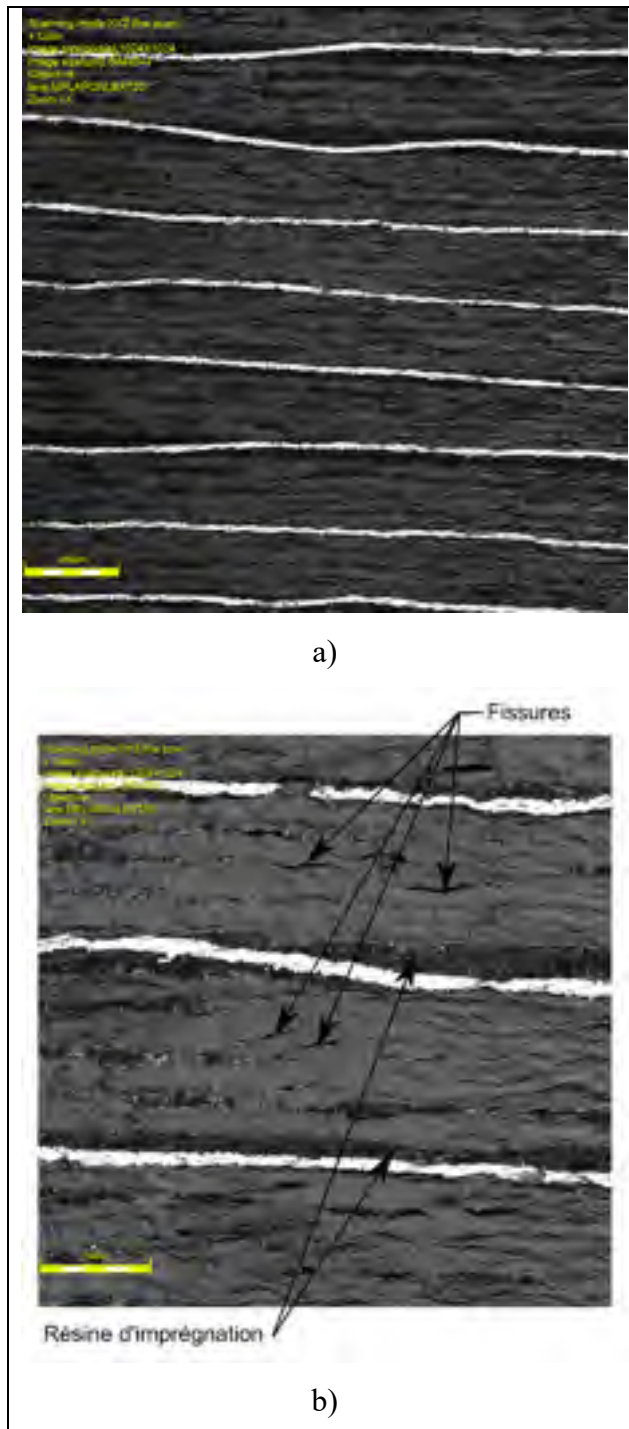


Figure 4.23 Coupes transversale de VPI 24 : a) à un grossissement de 200X et b) à un grossissement de 500X

La coupe transversale observée à un grossissement de 500X révèle que le papier contient de nombreuses fissures noires qui paraissent être des porosités ou des cavités au sein des couches de papier. Il est toutefois impossible de dire avec certitude si ces défauts étaient présents à l'origine ou sont le résultat de l'arrachement de fibre de papier lors du polissage.

Bien que le papier semble imprégné de manière homogène à partir des observations effectuées dans le plan, la coupe transversale révèle des porosités qui pourraient s'avérer être des défauts d'imprégnation. L'hypothèse d'une mauvaise imprégnation du papier par la résine reste valable, mais ne peut être vérifiée avec les moyens de découpes utilisés. Une découpe d'échantillon à froid sur un microtome permettrait d'obtenir un état de surface similaire en écartant le doute concernant l'arrachage des fibres lors du polissage. Néanmoins, aucune délamination n'est observée entre les couches de papier, même après le tronçonnage, ce qui conforte l'hypothèse que les délaminations à l'origine du grand nombre de DP observées dans les bobines à diélectrique mixte sont causées par la mauvaise adhésion du PPR.

4.5.2 Observation du mouillage des murs à diélectrique mixte par la résine époxy CY 192

Des coupes transversales ont été effectuées dans VPI 22 (bobine à diélectrique mixte non traitée corona) et VPI 26 (bobine à diélectrique mixte traitée corona) puis observées au microscope optique à confocal. Deux prises de vue à des grossissements de 500X et 1000X de VPI 22 et VPI 26 sont présentées à la Figure 4.24 et Figure 4.25. On distingue nettement la couche de papier et les deux couches de PPR composant le mur à diélectrique mixte pour chacune des bobines.

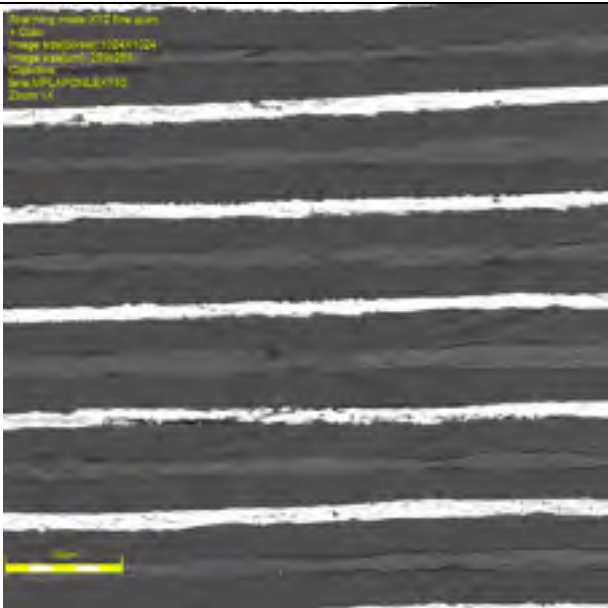


Figure 4.24 Coupe transversale de VPI 22 : a) à un grossissement de 500X et b) à un grossissement de 1000X

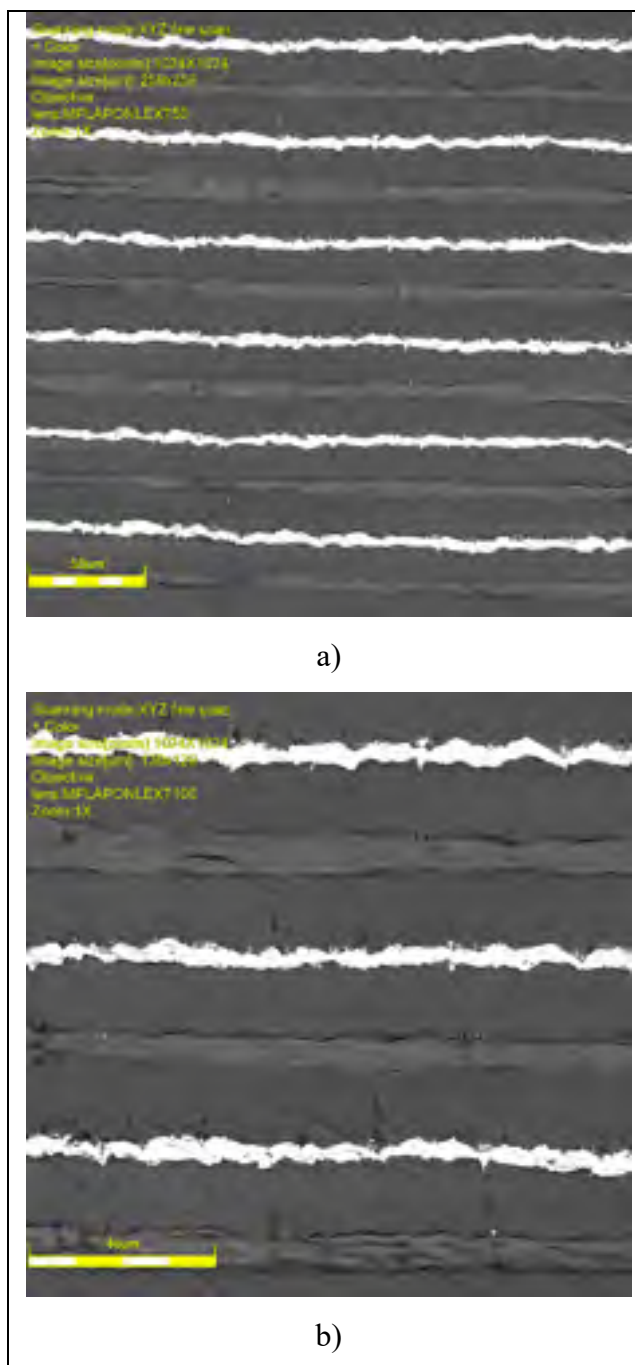


Figure 4.25 Coupe transversale de VPI 26 : a) à un grossissement de 500X et b) à un grossissement de 1000X

Contre toute attente, des délaminations sont observées à l'interface du papier et des films de PPR pour les deux bobines. En réalité, les vibrations de la tronçonneuse lors de la découpe des échantillons ont certainement pu entraîner la séparation du PPR et des couches de papier de VPI 26 malgré le traitement corona. Aucune conclusion ne peut être tirée concernant l'effet du traitement corona sur la taille ou le nombre de délaminations, bien que l'amélioration des performances liée au traitement soit avérée par les mesures de décharges partielles.

Enfin, on remarque que le papier imprégné présente des fissures similaires à celles observées dans VPI 24. Cette observation vient corroborer l'hypothèse d'une mauvaise imprégnation du papier par la résine époxy.

4.6 Discussion sur l'influence des paramètres de fabrication sur les caractéristiques électriques des condensateurs imprégnés

L'observation du papier imprégné de résine époxy révèle que ce dernier contient des porosités. Ces porosités seraient susceptibles d'être causées par une mauvaise imprégnation. Toutefois, les décharges partielles soupçonnées d'être causées par les délaminations entre les films de PPR et la résine époxy ont une intensité trop importante pour pouvoir étudier l'impact des paramètres de fabrication sur l'imprégnation.

Les paramètres de fabrication (ANNEXE II) des condensateurs VPI 24, VPI 26 et VPI 27 ont été comparés. Toutes les étapes de séchage ont duré au moins 72 h à 80 °C et 20×10^{-4} mbar de vide : on assume que l'humidité contenue dans les bobines a été extraite. Les observations lors de l'étape de dégazage montrent que la majorité des gaz en suspension dans la résine ont été retirés après 15 minutes de dégazage. Même si les temps de dégazage des résines des différentes fabrications sont inégaux, ils ont tous une durée supérieure à 15 minutes.

Le temps d'imprégnation de la résine époxy pourrait être un facteur déterminant pour permettre à la résine de remplir les porosités du papier. Néanmoins, la bobine est maintenue à 80 °C sous pression pendant 10 heures avant d'entamer le cycle de polymérisation. Les écarts de temps

d'imprégnations entre les différentes bobines sont donc jugés négligeables par rapport au temps d'imprégnation passé sous autoclave.

La qualité du mouillage du papier dépend aussi de la viscosité de la résine au moment de l'imprégnation. La viscosité de la résine étant influencée par sa température et son degré de polymérisation, la durée pendant laquelle la résine a été maintenue à chaud avant l'étape d'imprégnation peut servir d'indicateur concernant la viscosité de la résine. Ces données sont présentées au Tableau 4.17.

Tableau 4.17 Température et temps avant imprégnation

	Température (°C)	Temps avant imprégnation
VPI 24	70	21
VPI 26	80	18
VPI 27	74	43

On observe que le condensateur présentant le moins de décharges (VPI 26) a un temps avant imprégnation plus bas, mais à plus haute température. Néanmoins, on peut noter que cet écart de 20 minutes est minime par rapport au temps de gel de 8 heures indiqué dans la fiche technique de la résine.

Bien que les paramètres d'imprégnation ont nécessairement une influence la qualité de l'imprégnation, il se pourrait que les porosités observées soient uniquement liées au fait que le papier est difficilement mouillable même par une résine de faible viscosité. L'utilisation d'un papier moins dense ou un ensimage du papier actuel permettrait d'améliorer l'imprégnation.

À ce stade du développement et tant que les défauts majeurs (délamination) induits par les matériaux diélectriques ne sont pas résolus, il est difficile de conclure sur l'influence des paramètres de fabrication sur l'imprégnation finale du papier.

4.7 Conclusion sur le potentiel de la technologie de condensateur imprégné par procédé VPI

Différents enroulements capacitifs ont été imprégnés par procédé VPI à partir de deux résines différentes et leurs performances électriques ont été testées. La fissuration et une rigidité diélectrique plus faible des bobines imprégnées de résine silicone incite à privilégier la résine époxy comme imprégnant pour la suite du développement.

Bien que les rigidités diélectriques et les valeurs de tangentes de l'angle de perte soient encourageantes pour les bobines à diélectrique mixte imprégné de résine époxy, des niveaux de décharges partielles importants ont été mesurés. Des cavités formées à l'interface entre les couches de PPR et de papier à cause de la mauvaise adhésion entre les films de PPR et la résine d'imprégnation sont identifiées comme étant la source principale des DP. Le traitement corona des films de PPR vient confirmer cette hypothèse et montre une nette diminution des DP dans les condensateurs à diélectrique mixte, même si le niveau de DP reste élevé par rapport au critère du cahier des charges. Aucune conclusion ne peut être tirée concernant l'influence de la résine d'imprégnation et de la configuration des électrodes sur les décharges partielles tant que les niveaux de DP générés par les délaminations sont importants.

L'isolation tout papier imprégné apparaît comme le mur diélectrique le moins performant. Les résultats de DP et les observations de micrographies ont permis de mettre en lumière des porosités et des fissures attestant que l'imprégnation du papier n'est pas parfaite.

Une trop faible résistance au claquage de la résine époxy en bordure d'électrode pourrait aussi être la source de décharges partielles, mais cette hypothèse n'est pas vérifiée. Cette hypothèse mérite d'être étudiée et fera l'objet de simulation par éléments finis à un chapitre ultérieur.

CHAPITRE 5

PARTIE ACTIVE IMPRÉGNÉE PAR PROCÉDÉ VPI

5.1 Introduction

Après des premiers résultats encourageants obtenus à partir de bobines simples imprégnées, il a été décidé de réaliser des prototypes de condensateur VPI à partir de parties actives. Ces prototypes ont pour but d'étudier les performances d'un condensateur de plus grande échelle et d'anticiper les problèmes de fabrication qui pourraient y être associés.

Dans ce chapitre, des PA avec des cadres de PCB et des cadres de presspahn ont été imprégnées avec de la résine époxy CY 192. Les performances électriques des différents prototypes ont ensuite été testées et les résultats discutés.

5.2 Méthode de fabrication des prototypes

5.2.1 Description des différents prototypes imprégnés

Deux séries de PA à diélectrique mixte et à électrodes décalées ont été fabriquées par Condis. Les bobines sont connectées en série par l'intermédiaire de liaisons moletées. La configuration des électrodes décalées a été choisie afin d'abaisser la capacité des parties actives sans diminuer le nombre de bobines.

Les caractéristiques des deux séries de prototypes sont données au Tableau 5.1. La première série présentait une capacité imprégnée trop élevée pour pouvoir être claquée à avec la source haute tension sans atteindre sa limite d'intensité. Cette limitation a été prise en compte lors de la conception de la deuxième série en diminuant le nombre de bobines à 10 et en abaissant leur capacité non imprégnée.

Tableau 5.1 Caractéristiques des séries de prototypes fabriqués

	Série 1	Série 2
Matériau de la structure	PCB	Pressphan
Nombre de bobines	11	10
Capacité d'une bobine (nF)	110	82
Capacité totale non imprégnée (nF)	10	8,2
$U_{nominale}$ (kV)	15	15
U_{test} (kV)	44	40

La première série est montée dans une cage en PCB et ses bornes sont accessibles à partir de deux lamelles de cuivre étamé (Figure 5.1 a)). La deuxième série dispose d'une cage en pressphan et ses bornes sont accessibles par des fils souples en cuivre étamé (Figure 5.1 b)).

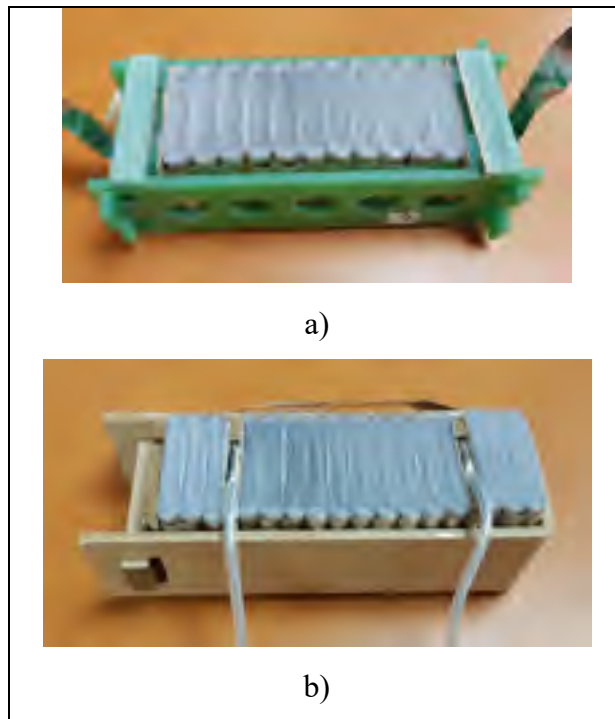


Figure 5.1 PA a) de la série 1 avec cadre en PCB, b) de la série 2 avec cadre en presspahn

Les deux groupes de 3 bobines observables aux extrémités de la PA de la Figure 5.1 b) sont des bobines non connectées utilisées comme « cales », afin de pouvoir utiliser une structure de dimension standard pour une PA plus petite.

Les prototypes fabriqués sont décrits au Tableau 5.2. Les proportions des mélanges des résines époxy CY 192 et le cycle de polymérisation sont identiques à ceux déjà utilisés pour l'imprégnation des bobines VPI, et sont rappelés en ANNEXE I.

Tableau 5.2 Description de la structure des prototypes

	Série de PA	Capacité mesurée avant imprégnation (nF)	Résine
Prototype 1	1	9,55	CY 192
Prototype 10	2	8,04	CY 192
Prototype 11	2	8,05	CY 192
Prototype 12	2	8,05	CY 192 avec plastifiant

5.2.2 Paramètres de fabrication des condensateurs imprégnés

Le montage de l'imprégnation VPI des prototypes et les étapes de fabrications sont identiques à ceux appliqués lors de l'imprégnation des bobines seules (voir section 4.3.2). Un moule en aluminium a été fabriqué pour pouvoir accueillir la PA lors de l'imprégnation. Le temps, la température et la pression appliqués pour chaque étape du procédé fabrication lors des condensateurs VPI sont donnés en ANNEXE II.

5.2.3 Fissuration des prototypes imprégnés en résine époxy CY 192 sans plastifiant

Une fissure importante a été observée sur le prototype 1 quelques jours après son démoulage (Figure 5.2). La fissure a été initiée au niveau de l'arrêt d'un panneau du cadre en PCB.



Figure 5.2 Fissure pénétrant dans la PA du prototype 1

Les concentrations de contraintes générées par le retrait de la résine aux interfaces de la structure de PCB rigide ont été identifiées comme la cause de ses fissures.

La série 2 a donc été conçue avec une structure en presspahn afin de diminuer la rigidité de la cage entourant la PA. Néanmoins, le prototype 10 a aussi démontré des fissurations initiées au niveau des angles vifs de la structure. L'utilisation de plastifiant à hauteur de 15 PHR dans les mélanges de résine époxy des prototypes 11 et 12 a permis de résoudre le problème.

5.3 Essais électriques

Les caractéristiques attendues pour les condensateurs des deux séries sont présentées dans le Tableau 5.3.

Tableau 5.3 Caractéristiques électriques attendues pour un prototype sec

	Série 1	Série 2
Capacité (nF)	≈ 10	≈ 10
Tension AC nominale V_{nominale} (kV)	15	15
Tension AC test V_{test} (kV)	44	40
Fréquence d'opération (Hz)	60	60
$\tan(\delta)$	$< 20 \times 10^{-4}$	$< 20 \times 10^{-4}$
Décharges partielles (pC) à V_{nominale} pendant 60 s	< 5	< 5
Rigidité diélectrique équivalente de l'isolant (kV/mm)	> 112	> 112

5.3.1 Spectroscopie diélectrique

La capacité et la tangente de l'angle de perte des prototypes sont caractérisées par spectroscopie diélectrique, en suivant la méthode décrite à la section 2.2.3. Chaque prototype est soumis à une tension alternative de 1 V. Les propriétés diélectriques du matériau sont mesurées pour 46 valeurs de fréquence différentes. Ces valeurs sont uniformément réparties sur l'échelle logarithmique d'un intervalle de fréquence de 3×10^5 Hz à 0,1 Hz. Les capacités et $\tan(\delta)$ sur la plage de 1 Hz à 10^3 Hz sont présentés à la Figure 5.3.

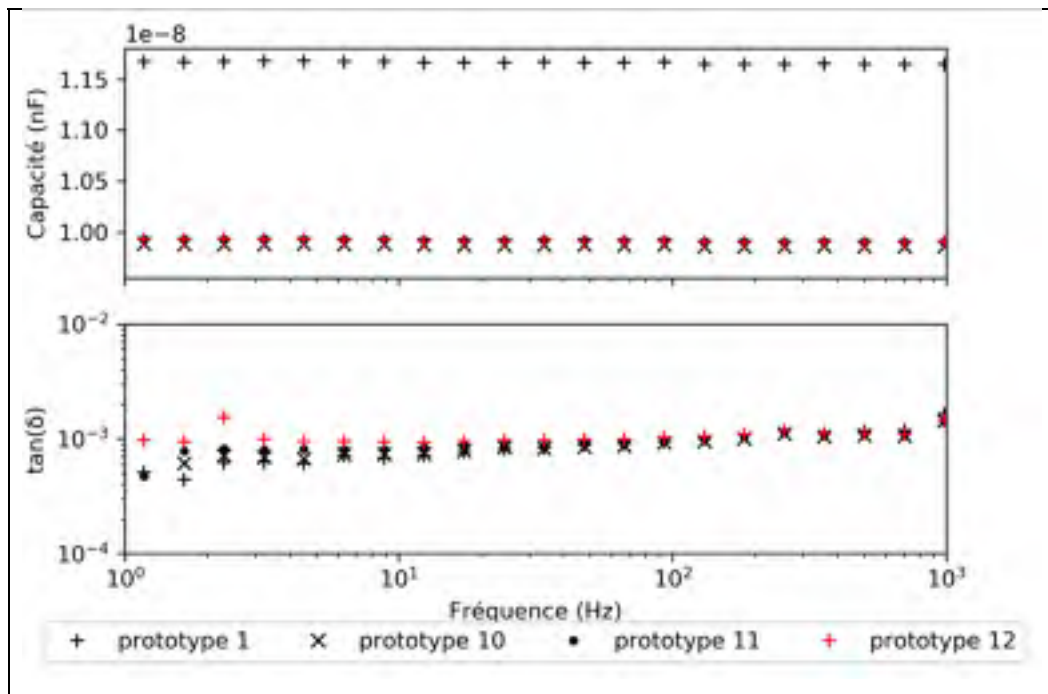


Figure 5.3 Capacité et $\tan(\delta)$ des prototypes de 1 Hz à 10^3 Hz

Comme il pouvait être attendu au regard des résultats obtenus avec les bobines VPI à diélectrique mixte imprégnées de résine époxy CY 192, la tangente de l'angle de perte des prototypes à 60 Hz est en dessous du seuil fixé par le cahier des charges.

5.3.2 Mesure et analyse de décharges partielles

Les DP des prototypes 11 et 12 ont été mesurées. Au cours de la mesure de DP du prototype 1, un grésillement et une odeur d’ozone, produit de la réaction chimique des DP dans l’air (IEEE Std 1434), indiquent que la fissure avait bel et bien atteint le cœur de la partie active. Pour cette raison, aucun essai de DP n’a été réalisé sur le prototype 10 comme celui-ci contenait aussi une fissure. Lors des mesures, le prototype est connecté en parallèle avec le condensateur de mesure. Le montage et le protocole de mesure sont présentés dans la section 2.2.4. La mesure est réalisée pendant 60 secondes, avec une période de référence t_{Ref} de 10 secondes.

Les histogrammes de décharges partielles de prototype 11 et prototype 12 sont présentés respectivement à la Figure 5.4 et à la Figure 5.5. Une période du signal de tension est représentée par la courbe sinusoïdale verte et les événements de décharges sont positionnés dans l’histogramme par rapport à sa phase.

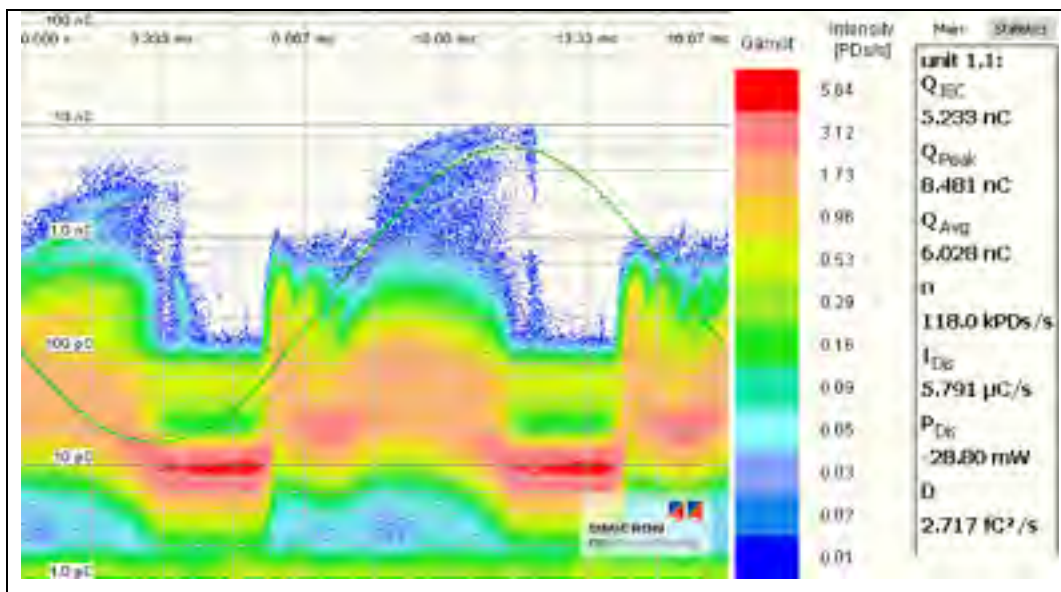


Figure 5.4 Mesures de décharges partielles du prototype 11 à $U_{nominale} = 15$ kV
Le bruit de fond du montage avant mesure est inférieur à 6 pC

Les deux prototypes testés présentent des patrons en « oreille de lapin », associées à des décharges dans des cavités possiblement créées par la délamination du PPR et de la résine époxy. On observe aussi des nuages de DP qui sembleraient être caractéristiques d'une mauvaise imprégnation du papier et d'un possible claquage des fines pellicules de résine époxy. Néanmoins, les niveaux de DP observés dans le prototype 11 et le prototype 12 sont analogues l'intensité observée sur les bobines à électrodes décalées et à diélectrique mixte VPI 20 et VPI 21, dont les histogrammes sont présentés en ANNEXE III.

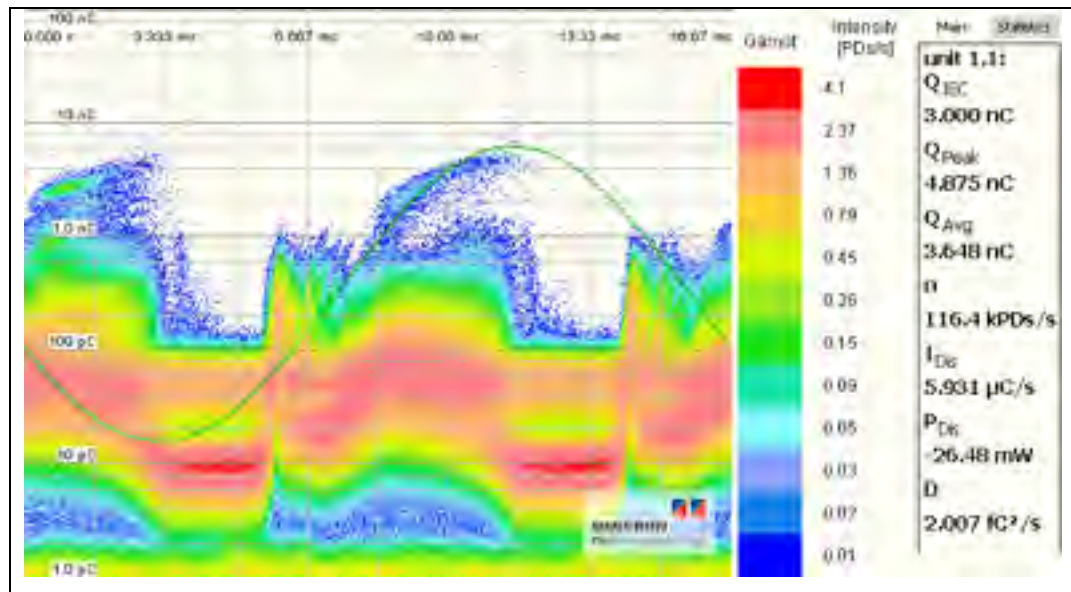


Figure 5.5 Mesures de décharges partielles du prototype 12 à $U_{nominale} = 15$ kV
Le bruit de fond du montage avant mesure est inférieur à 6 pC

5.3.3 Essai de claquage

Des essais de claquage ont été réalisés sur les prototypes à partir du montage décrit à la section 2.2.5.3, en retirant le système d'acquisition des DP.

Tous les condensateurs ont été soumis à une rampe de tension cible jusqu'à 49 kV. Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 5.4. La limite d'intensité de la source a été atteinte

avant le claquage du prototype 1 comme ce dernier avait une capacité trop importante. Sa rigidité diélectrique a été calculée à partir de la valeur de tension atteinte avant la mise en défaut de la source.

Tableau 5.4 Tension de claquage des prototypes et rigidité diélectrique ramenée à une bobine

	Épaisseur théorique du mur diélectrique (μm)	Tension de claquage (kV)	Tension de claquage pour une bobine (kV)	Rigidité diélectrique (kV/mm)
Prototype 1	35,4	Non claqué à 37,24	3,72	105,1
Prototype 11	35,4	36,77	3,67	103,9
Prototype 12	35,4	34,04	3,4	96,1

Des mesures de capacité après essais indiquent que les prototypes 11 et 12 sont toujours fonctionnels et que seule une bobine de leur PA a été claquée. Cette observation sur les deux prototypes met hors de cause les liaisons moletées entre les bobines comme point faible qui pourrait engendrer un claquage.

On remarque que la rigidité diélectrique des prototypes est inférieure à celles des bobines simples imprégnées à électrode décalées d'au moins 12%. Ce constat s'explique par le fait que le risque d'avoir une bobine défectueuse dans une PA, menant au claquage précoce du condensateur, est d'autant plus important que le nombre de bobines constituant la PA est grand. La rigidité diélectrique de la PA correspond à la plus faible rigidité diélectrique des bobines constituant la PA.

5.4 Observation de l'imprégnation des extrémités des électrodes

Des observations d'échantillons prélevés sur le prototype 12 ont été réalisées au microscope optique à confocal Olympus LEXT4100 afin d'inspecter la qualité de l'imprégnation.

Les échantillons sont découpés avec une tronçonneuse à disque abrasif et les surfaces d'observation sont polies à l'eau par la séquence de papiers de grains abrasifs de taille 120, 240, 400, 600 et 800. Le polissage a été effectué sur une table de polissage métallographique rotative à une vitesse de 300 tours par minutes.

Deux prises de vue à des grossissements de 500X et 1000X du prototype 12 sont présentées à la Figure 5.6. On observe toujours des délaminations à l'interface des films de PPR et des fissures à l'intérieur du papier imprégné, identique à celles relevées dans les bobines VPI.

On remarque de petites porosités (points noirs) dans la résine époxy située aux extrémités des électrodes sur la vue à 1000X. Néanmoins, l'origine de ces porosités n'est pas clairement identifiée. Elles pourraient avoir été causées par des bulles de gaz qui n'auraient pas été extraites lors de l'étape de l'imprégnation, et qui auraient été emprisonnées au rapprochement des deux films de PPR. Ces porosités pourraient aussi être causées suite au claquage local de la résine époxy induit par des concentrations de champs excédant la rigidité diélectrique de la résine en extrémité d'électrode. Dans les deux cas, ces défauts ne sont pas acceptables pour atteindre les caractéristiques attendues.

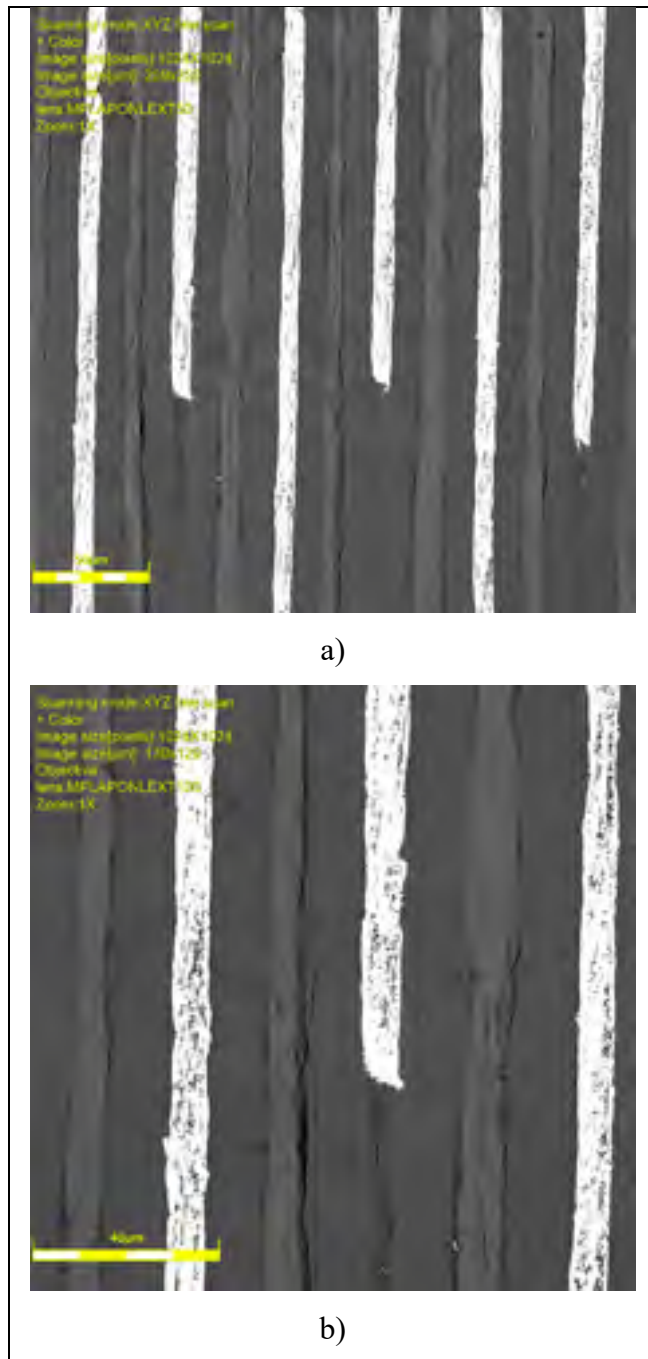


Figure 5.6 Observation des extrémités des électrodes du prototype 12 a) à un grossissement de 500X et b) à un grossissement de 1000X

5.5 Conclusion sur la fabrication des prototypes fabriqués par procédé VPI

La problématique de fissuration observée des prototypes de la première série a été solutionnée en utilisant des structures en presspahn et en ajoutant 15 PHR de plastifiant DY 040 à la résine époxy CY 192.

Les prototypes à diélectrique mixte présentent une $\tan(\delta)$ acceptable et des décharges partielles du même ordre de grandeur que celles observées sur les bobines VPI du même type de construction. Les pistes concernant l'origine des DP sont identiques à celles déjà énoncées pour les bobines VPI. La rigidité diélectrique des prototypes est inférieure à celles des bobines simples dues au fait que le nombre de bobines augmente le risque de défauts pouvant mener à un claquage prématuré.

Des observations au microscope révèlent des porosités dans la résine époxy présente aux extrémités des électrodes. L'origine de ses porosités n'est pas clairement identifiée, néanmoins une concentration de champs en bordure d'électrode pourrait amplifier les DP observées dans les condensateurs à électrode décalées en plus de diminuer la tenue en claquage des condensateurs. Cette hypothèse sera étudiée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 6

DISTRIBUTION DU CHAMP ÉLECTRIQUE ET DES EFFETS DE BORDS DANS UN CONDENSATEUR IMPRÉGNÉ PAR PROCÉDÉ VPI

6.1 Contexte de l'étude de la distribution de champ dans les condensateurs imprégnés

Une des hypothèses pouvant justifier l'observation d'un niveau de DP élevé dans les bobines VPI est que le champ électrostatique subit par les fines couches de résine d'imprégnation dépasse sa valeur de rigidité diélectrique, sans toutefois claquer le mur diélectrique du condensateur.

Les essais électriques menés sur les PA imprégnées ont montré que les tensions de claquage des bobines à électrodes décalées constituant les prototypes sont inférieures aux tensions de claquage des bobines simples à électrode alignées. Ce décalage pourrait être une source de concentration de champ en bord d'électrode menant à un claquage prématuré du condensateur. De même, cette configuration pourrait mener à la dégradation de la résine époxy en bordure d'électrode et qui se traduirait par l'apparition précoce de DP.

Un modèle par éléments finis permettant d'évaluer les effets de bords aux électrodes de condensateurs à diélectriques mixtes imprégnés de résine époxy CY 192 avec plastifiant. Ces effets de bords ont été analysés pour la configuration à électrodes alignées et la configuration à électrodes décalées.

La méthodologie et la description du modèle sont d'abord présentées, suivies d'une validation analytique de certains résultats. Finalement, l'analyse de la distribution de potentiel et de champs sera proposée et les résultats seront discutés.

6.2 Méthodologie

Des modèles éléments finis (EF) de la distribution du champ dans différentes configurations de condensateurs plans représentatifs des parties actives et enroulements capacitifs testés ont été générés. Cette section présente les paramètres des matériaux et l'approche de modélisation et d'analyse.

6.2.1 Paramètres physiques

L'influence sur la distribution de champ électrostatique des configurations d'électrodes décalées et alignées est étudiée pour des condensateurs à diélectrique mixte imprégnés de résine époxy CY 192 avec plastifiant. La première configuration est analogue aux bobines simples alors que la seconde configuration est celle des bobines constituant les PA de prototypes. Les propriétés diélectriques des matériaux sont données au Tableau 6.1 et les caractéristiques géométriques du mur diélectriques sont présentées au Tableau 6.2.

Tableau 6.1 Propriétés des matériaux

	Permittivité relative	Rigidité diélectrique (kV/mm)
CY 192 avec plastifiant	3,1	61,2 (590 μm)
PPR	2,2 (Huan et al., 2016)	350 – 475 (12,7 μm)
Huile synthétique Jarylec	2,7	70 (Mouriès, 2007)
Papier imprégné d'huile	5,14	131,5
Papier imprégné de CY 192	3,61	272 (15 μm)

La permittivité relative à 60 Hz du papier imprégné d'époxy CY 192 avec plastifiant a été mesurée par spectroscopie sur VPI 24 en supposant que le mur diélectrique tout papier de la bobine était homogène.

Tableau 6.2 Caractéristiques géométriques

	Électrodes alignées	Électrodes décalées
Épaisseur des couches de résine époxy (μm) (a)	0,2	0,2
Épaisseur des films polypropylène (μm)	12,7	12,7
Épaisseur du papier (μm)	10	10
Épaisseur des électrodes(μm)	5	5
Largeur des films PP (mm)	55	55
Largeur du papier (mm)	50	50
Largeur des électrodes (mm)	45	30
Superposition des électrodes (mm)	45	15
(a) Dimension estimée supérieure à la réalité pour faciliter le maillage.		

6.2.2 Modèle éléments finis

Le modèle EF est résolu avec le solveur électrostatique d'ANSYS APDL V14. Il représente une coupe transversale d'un enroulement capacitif. L'épaisseur du mur diélectrique étant très faible par rapport aux autres dimensions de la bobine, seule une portion de la bobine est modélisée.

Cette portion consiste en deux murs diélectriques situés de part et d'autre d'une électrode centrale chargée positivement. Les parois externes sont bornées à droite et à gauche par des électrodes de demi-épaisseur à potentiel nul et en haut par de la résine. Les zones de différents matériaux se prolongent en haut selon les dimensions réelles du condensateur présentées au Tableau 6.2. Par économie de temps de simulation, la portion centrale du condensateur où le champ est relativement homogène dans chaque couche du mur diélectrique n'est pas entièrement représentée et le modèle tire parti de la symétrie par rapport à l'axe central de la

bobine. La Figure 6.1 illustre le découpage de la géométrie aux abords de l'électrode centrale positive pour la configuration alignée.

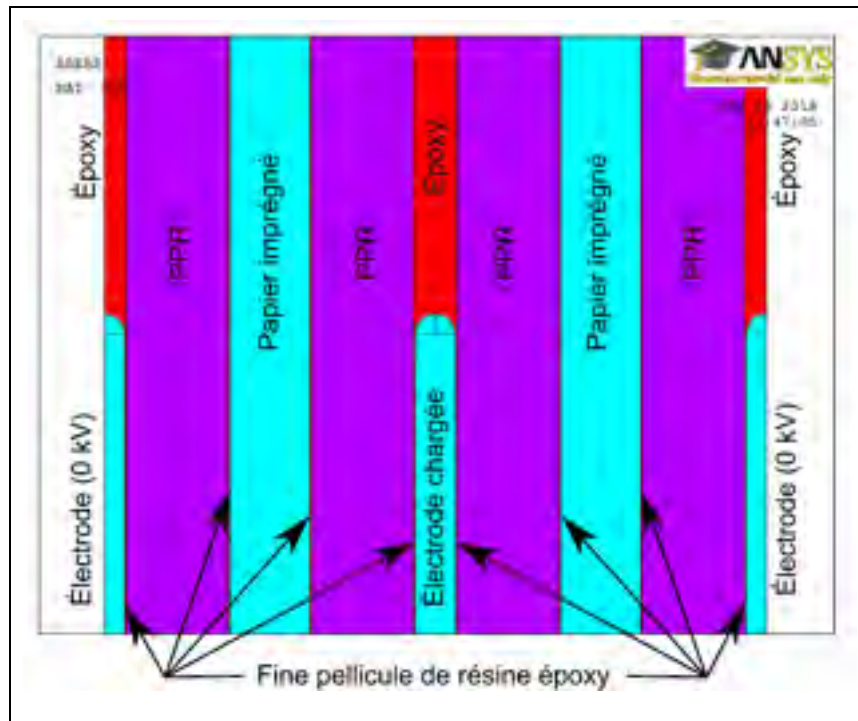


Figure 6.1 Géométrie du modèle à électrodes alignées

Chaque modèle dispose du même mur diélectrique. Le modèle d'une bobine à diélectrique mixte est composé de deux films de polypropylène et d'un film de papier. Pour chaque modèle EF, les couches constituant le mur diélectrique et les électrodes sont séparées des couches adjacentes par une pellicule de résine de $0,2\ \mu\text{m}$, comme visualisées lors des observations au microscope à la section 5.4. Dans les condensateurs réels fabriqués, l'épaisseur de cette couche est inconnue et serait probablement plus mince. Néanmoins, cette approximation est nécessaire pour permettre le maillage.

La modélisation d'électrode à bouts droits engendrerait une singularité numérique au niveau des sommets de son extrémité qui feraient diverger la valeur locale du champ électrostatique à

mesure que le maillage est raffiné. Or, comme l'objectif du modèle est de quantifier la valeur du champ électrostatique en bordure d'électrode, des extrémités circulaires ont été choisies pour éliminer ce problème. L'extrémité de l'électrode est modélisée par un arrondi de 5 μm de diamètre (épaisseur de l'électrode). Il est à noter que la configuration à bout arrondi correspond probablement à un cas favorable par rapport à la condition réelle.

6.2.3 Maillage et convergence

Le modèle est maillé à l'aide d'éléments 2D électrostatique à huit nœuds PLANE121. Les éléments utilisés sont du deuxième ordre et comportent un nœud central sur chaque côté, permettant une approximation plus fine de la géométrie, de la distribution de potentiel et du champ électrostatique par rapport à un maillage réalisé avec des éléments linéaires. La taille du maillage est choisie grâce à une analyse de convergence (Cook, Malkus, Plesha, & Witt, 2002) sur le champ maximum au sommet de l'électrode arrondie, pour une configuration à électrode alignée.

Un maillage de taille d'éléments de 2 μm et disposant d'une erreur relative de 3% sur la solution convergée estimée est retenu. Tous les éléments sont contraints à cette dimension afin de faciliter le maillage et minimiser les distorsions. Le maillage est présenté à la Figure 6.2.

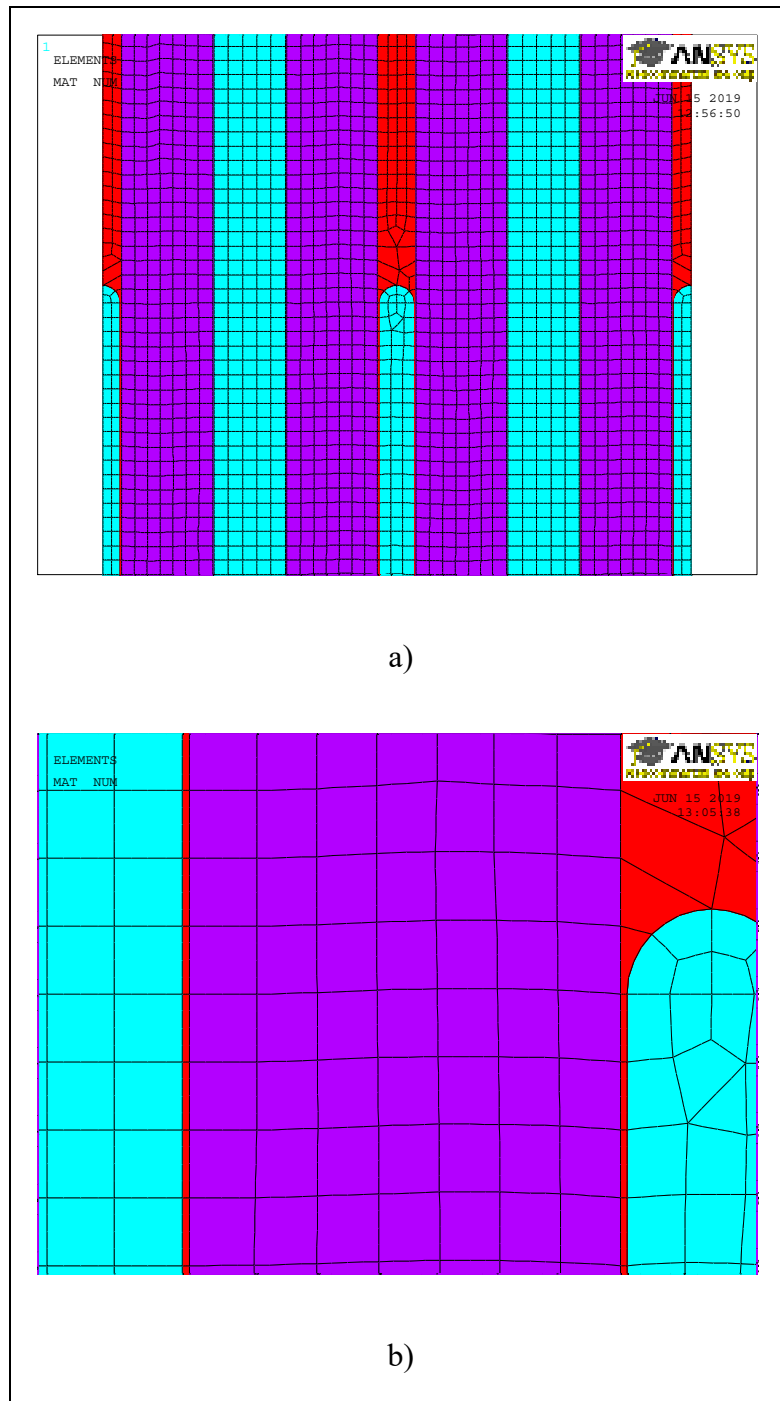


Figure 6.2 Maillage de 2 μm sur le modèle à électrode alignée a) vue de toutes les couches, b) vue rapprochée d'une pellicule d'époxy

6.2.4 Validation analytique des modèles EF

La solution EF dans la partie du modèle homogène, c'est-à-dire la portion éloignée des extrémités des électrodes et des effets de bords qui y sont associés, est validée en comparant les valeurs des champs simulés aux champs analytiques calculés à partir de l'équation 1.31 (section 1.4.1) pour chaque couche du mur diélectrique.

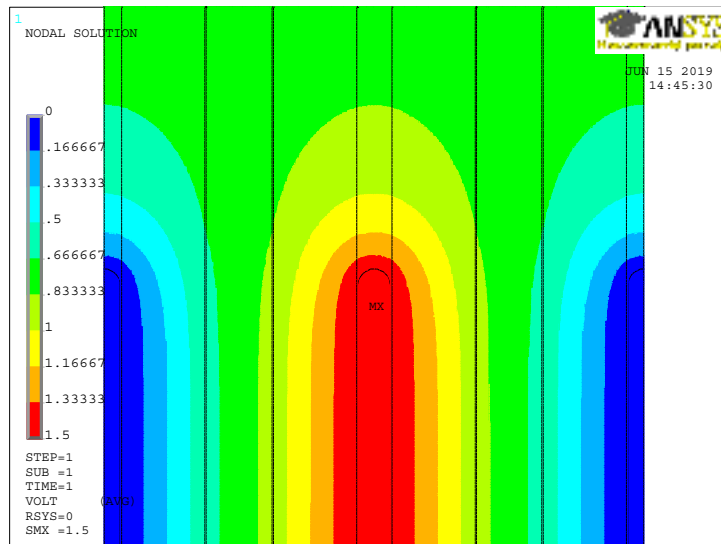
Ainsi, pour les matériaux et épaisseurs données soumis à une différence de potentiel de 1,5 kV, les solutions analytiques et EF pour chacune des couches sont données au Tableau 6.3. On y voit que la distribution du champ homogène produite par le modèle EF dans les deux configurations respecte rigoureusement la solution analytique. La solution EF est donc validée.

Tableau 6.3 Solutions analytiques et éléments finis du champ

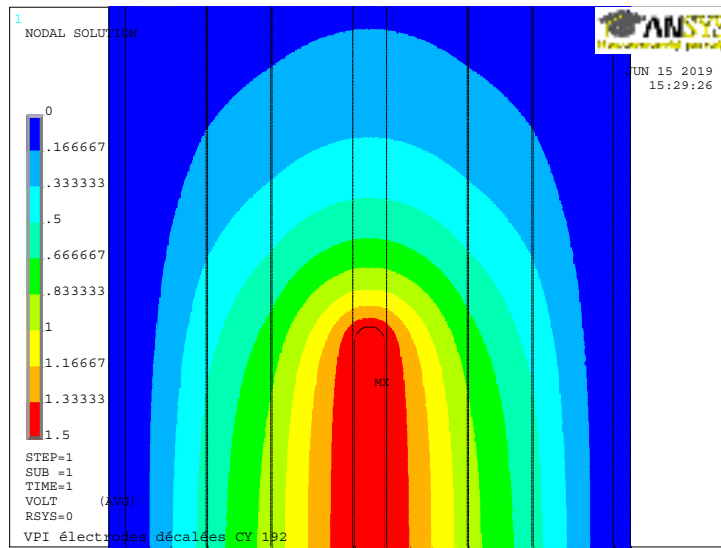
Champ	Solution analytique (kV/mm)	Solution EF électrodes alignées (kV/mm)	Solution EF électrodes décalées (kV/mm)
Résine époxy CY 192	33,2	33,2	33,2
PPR	46,8	46,8	46,8
Papier imprégné de résine CY 192	28,5	28,5	28,5

6.3 Analyse de l'effet de la configuration des électrodes sur la distribution du potentiel

Les distributions du potentiel en bordure d'électrode pour des configurations alignées et décalées sont montrées à la Figure 6.3. Les distributions sont toutes les deux symétriques par rapport à l'électrode centrale.



a)



b)

Figure 6.3 Distribution du potentiel électrostatique en kV pour
a) des électrodes alignées, b) des électrodes décalées

Pour la configuration à électrodes alignées, la chute de potentiel dans la direction verticale au-dessus de l'électrode centrale se fait progressivement. L'effet de bord semble ainsi assez circonscrit autour de la pointe de l'électrode et ne pas s'étendre fortement vers la portion centrale. À une distance verticale d'environ une ou deux fois l'épaisseur de l'électrode (en bas de la pointe), la distribution de potentiel n'est plus influencée par l'effet de bord.

Pour la configuration décalée, on remarque une chute du potentiel beaucoup plus prononcée dans la direction verticale au-dessus de l'électrode chargée. Selon cette direction, le gradient de potentiel apparaît comme environ deux fois plus élevé qu'avec des électrodes alignées, ce qui présuppose une concentration de champ plus élevée dans cette configuration. Le gradient est aussi plus élevé dans la direction horizontale autour de l'extrémité de l'électrode. On observe que les deux distributions sont identiques dans la portion centrale, une fois éloignée du bord de l'électrode.

Il est à noter que dans le cas de la configuration à électrodes alignées, la distribution symétrique du potentiel induit une concentration de champ au sommet de toutes les électrodes, mais l'étendue spatiale de cette concentration est relativement restreinte. Par contre, dans la configuration décalée, la concentration de champ est plus étendue dans le volume autour de l'électrode centrale enfouie, mais une grande portion des électrodes débordantes est soumise à un champ fortement diminué.

6.4 Analyse de l'effet de la configuration des électrodes sur la distribution de champ électrostatique

Le champ électrostatique à 1,5 kV dans les différentes couches du mur diélectrique mixte a été simulé pour les deux configurations d'électrodes et est présenté à la Figure 6.4.

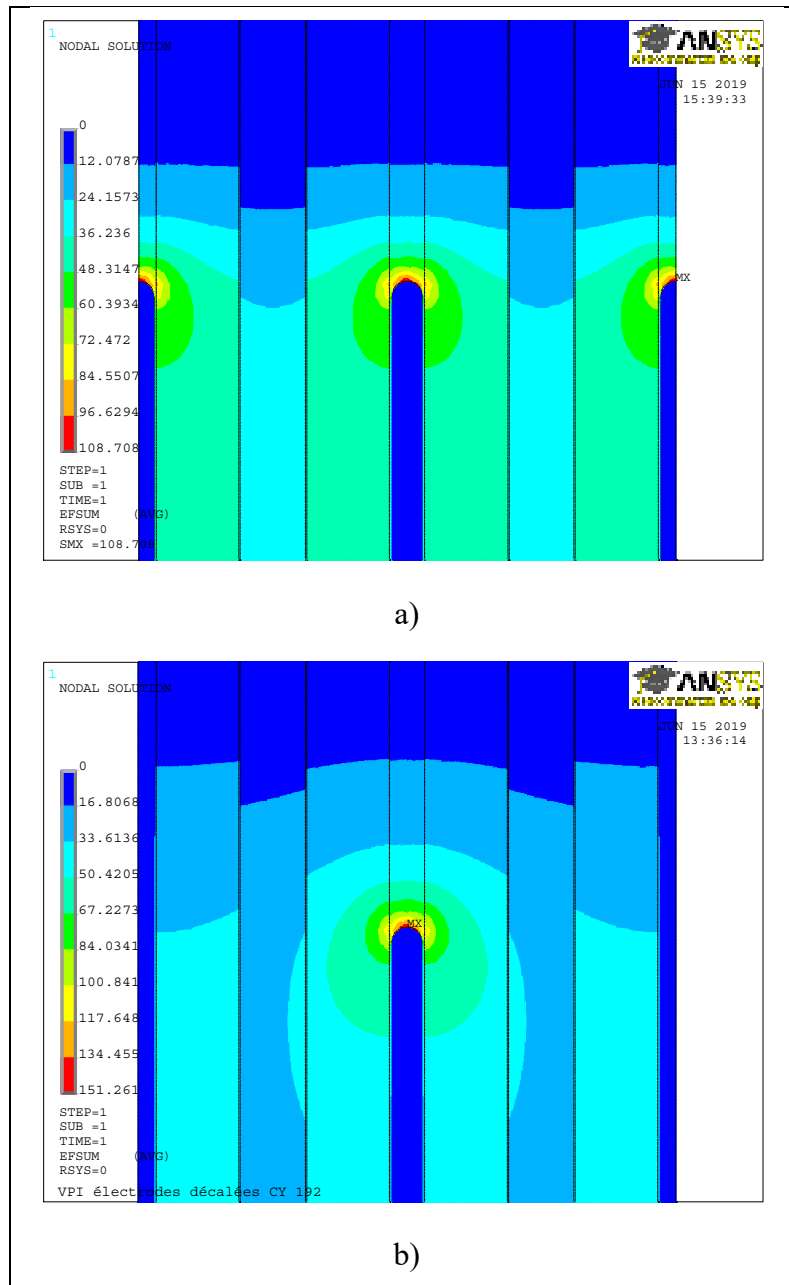


Figure 6.4 Distribution du champ électrostatique en kV/mm pour a) des électrodes alignées, b) des électrodes décalées

Le Tableau 6.4 présente les valeurs de champs électrostatiques simulés dans les différentes couches du mur diélectrique mixte pour les deux configurations. Ces valeurs ont été relevées dans les milieux des couches situées à droite de l'électrode centrale, sur une ligne horizontale tangente à l'extrémité de l'électrode.

Le champ maximal dans la résine époxy en bordure d'électrode est environ 40% supérieur dans le cas de la configuration à électrode décalée. On constate que les valeurs de champs dans la résine époxy sont supérieures à la rigidité diélectrique mesurée de 61,2 kV/mm, même si en réalité cette valeur doit être plus élevée comme nous sommes dans le cas d'une couche de 5 μm . On observe que les valeurs de champ dans les autres couches de matériau sont toutes inférieures aux rigidités diélectriques, ce qui est compatible avec la réalité, car les bobines à diélectrique mixte claquent à une tension supérieure à 1,5 kV.

Tableau 6.4 Champs électrostatique simulé (kV/mm) dans le milieu des couches des murs diélectriques mixte pour un potentiel de 1,5 kV et les rigidités diélectriques associées			
Couches	Électrodes alignées	Électrodes décalées	Rigidité diélectrique
Résine époxy en extrémité d'électrode	108,7	151,3	61,2 (590 μm)
1 ^{ère} couche de PPR	43	54,3	350 - 475
Pellicule de résine époxy	25,9	32,8	61,2 (590 μm)
Papier imprégné	20,2	29,3	272 (15 μm)
Pellicule de résine époxy	24,4	26,3	61,2 (590 μm)
2 nd couche de PPR	43	33,7	350 - 475

On constate que le champ dans le papier imprégné est 45% plus important dans une configuration à électrode décalée. De même, le champ dans la couche de PPR la plus proche de l'électrode chargée est environ 25% plus élevé dans la configuration à électrodes décalées.

Néanmoins, on observe que cela s'inverse la seconde couche de PPR, dans laquelle le champ le plus important est observé dans la configuration à électrodes alignées.

Les différences de distribution de potentiel et donc de champ électrostatiques des deux configurations induisent un comportement et une durabilité différente dans la pratique : un condensateur à électrodes alignées serait en mesure de résister une tension plus élevée, car les concentrations de champs dans les différentes couches de matériau sont moins élevées.

Néanmoins, la configuration à électrode décalée pourrait s'avérer bénéfique pour une utilisation du condensateur à plus basse tension : la concentration de champ n'a lieu qu'aux extrémités des électrodes enfouies et sur un faible volume de matériau, contrairement à la configuration alignée où toutes les bordures d'électrodes sont sollicitées. Le volume de matériau pour lequel le champ est abaissé est donc à lui assez grand dans le cas où les électrodes sont décalées. La durabilité sera alors déterminée par les effets concurrents de la probabilité qu'un défaut accélérant la défaillance existe dans la zone de concentration de champ et de la probabilité qu'un défaut qui aurait normalement accéléré la détérioration soit exclu par la diminution du champ à l'électrode débordante.

La configuration à électrode alignée est conseillée pour la fabrication des prochaines PA de prototype. Même si le claquage local de la résine n'est pas vérifié, l'augmentation de champ induite observée avec la configuration à électrodes décalées reste un risque de défaillance à plus faible tension pour le condensateur si les électrodes sont décalées.

6.5 Conclusions des simulations éléments finis

Un modèle EF permettant d'évaluer les effets de bords au sommet des électrodes du condensateur à diélectrique mixte imprégné d'époxy a été réalisé pour les configurations d'électrode alignées et d'électrodes décalées. Les modèles montrent que le champ

électrostatique dans la résine époxy située à l'extrémité des électrodes une configuration décalée est 40% supérieur au champ simulé dans une configuration alignée.

Ces observations permettent de prédire qu'une dégradation de la résine époxy, entraînant l'apparition de DP, pourrait avoir lieu à une tension inférieure dans un condensateur à électrodes décalées. Une configuration à électrodes alignées est donc fortement conseillée pour la prochaine série de PA fabriquée.

CONCLUSION

Les performances de deux technologies de condensateur sec haute tension ont été évaluées. La première conception consiste à obtenir un condensateur monolithique après superposition d'électrodes d'aluminium laminées et de couches de composite diélectriques. Des condensateurs plats ont été fabriqués à partir de différents préimprégnés disponibles dans le commerce. Les résultats des essais électriques ont montré qu'un préimprégné constitué d'une électrode d'aluminium laminé et d'une couche de polypropylène présente une rigidité diélectrique insuffisante pour satisfaire l'application haute tension visée. Ce premier résultat reste toutefois encourageant, car un préimprégné constitué de plusieurs couches de polypropylène permettra d'atteindre une rigidité diélectrique plus élevée. Des délaminations ont aussi été observées à l'interface entre la résine époxy et le film de polypropylène, laissant présager une mauvaise durabilité si ce problème n'est pas résolu. Néanmoins, les difficultés de mise en œuvre des empilements lors de la fabrication ont écarté l'application de cette technologie à l'échelle d'un prototype pour le moment.

La deuxième conception consiste à remplacer l'huile diélectrique utilisée dans les condensateurs actuels par une résine thermodurcissable de faible viscosité par procédé VPI. Plusieurs enroulements capacitifs simples ont été imprégnés avec deux résines thermodurcissables afin de comparer les performances de différentes configurations de murs diélectriques. Sur les deux résines utilisées, la résine époxy a été retenue au détriment de la résine silicone qui entraînait des fissurations du condensateur. Les rigidités diélectriques des différents matériaux constituant le mur diélectrique des bobines ont été caractérisées. Les performances des bobines ont été testées et montrent qu'un mur diélectrique mixte imprégné a une rigidité diélectrique satisfaisante pour une application haute tension. Néanmoins, les essais ont démontré que des délaminations entre les couches de polypropylène et la résine d'imprégnation pourraient être à l'origine de décharges partielles importantes. Un traitement corona des films de polypropylène permet de résoudre partiellement le problème de décharges partielles en diminuant grandement l'intensité et le nombre d'événements de décharges.

Néanmoins, des observations au microscope optique du papier imprégné révèlent la présence de porosité, indiquant que le papier n'est pas correctement mouillé par la résine. Retirer le papier dans le mur diélectrique ou utiliser un papier moins dense permettra possiblement d'abaisser le niveau de décharges partielles dans les prochains condensateurs.

Des prototypes de condensateur VPI ont été fabriqués en imprégnant une partie active avec de la résine époxy. Ces prototypes ont permis de mettre au jour des problèmes de fissuration de la résine dans un condensateur plus volumineux. Ces fissures ont été éliminées en ajoutant un plastifiant à la résine époxy et en utilisant un cadre moins rigide (presspahn). Les essais de claquage des prototypes ont aussi montré que la rigidité diélectrique des parties actives correspond à la rigidité diélectrique de la bobine la plus faible.

Enfin un modèle élément fini a permis d'étudier l'influence de la configuration des électrodes sur la concentration de champs en bordure de celles-ci. Les modèles démontrent que le champ électrostatique est 40% en bordure d'électrodes dans une configuration décalée, ce qui incite à fabriquer les prochaines parties actives avec des électrodes alignées.

Les prochaines étapes du développement seraient d'imprégner un condensateur à électrodes alignées, sans papier et dont les films de PPR ont été traité corona.

ANNEXE I

MÉTHODE DE FABRICATION DES CONDENSATEURS PLATS

Cette annexe présente la méthode d'empilement des condensateurs plats. La plaque de fabrication est préalablement traitée avec un agent scellant Zyvox Sealer GP et un agent démoulant Zyvox EnviroShield de ChemTrend afin de faciliter l'opération de démoulage. La manipulation des préimprégnés et des électrodes est effectuée avec des gants en Latex, afin d'éviter les dépôts de graisse ou de poussière entre les couches des condensateurs. Lors du dépôt de la première couche, le film de protection du préimprégné est décollé et le matériau composite est placé sur la plaque de fabrication. La première épaisseur de composite n'adhère pas toujours à la plaque de fabrication : dans le cas du DPF 1/50/1, l'électricité statique emmagasinée par le film de PET le fait glisser sur la plaque d'aluminium. Dans ce cas, la première épaisseur de composite est positionnée à l'aide d'un adhésif haute température. Les strates de composite sont écrasées à l'aide d'une spatule en plastique souple pour chasser les bulles d'air emprisonnées sous le préimprégné.

La première électrode est ensuite déposée. L'électricité statique complique la manipulation des électrodes d'aluminium qui peuvent se froisser facilement. Le positionnement des électrodes sur les préimprégnés de FM 300 et de Thinpreg 402 demande une précaution particulière : ces préimprégnés sont suffisamment collant pour que le retrait d'une électrode soit impossible sans la déchirer. L'empilement des autres couches de préimprégné et de la deuxième électrode est identique au procédé décrit précédemment. La Figure-A I-1 montre le montage des condensateurs fabriqués en Thinpreg 402 avant cuisson.



Figure-A I-1 Condensateurs de la série LAM_04 en Thinpreg 402, avant cuisson

Lors de la fabrication de la série LAM_06, le papier de protection de la couche inférieure est retiré et cette dernière est placée sur la plaque d'aluminium avec un scotch adhésif. Le papier de protection est alors réutilisé sur le dessus du préimprégné, afin d'éviter le contact entre la spatule en plastique et le composite lors de l'aplanissement de la couche inférieure. Le film protecteur est ensuite replié sur lui-même et retiré délicatement. L'adhésif est utilisé comme repère pour positionner la strate supérieure du condensateur par rapport à la couche inférieure. La deuxième couche de Laminé 1 est appliquée suivant la même méthode.

ANNEXE II

PARAMÈTRES DE FABRICATIONS DES CONDENSATEURS IMPRÉGNÉS PAR PROCÉDÉ VPI

Tableau-A II-1 Paramètres de fabrication des bobines VPI fabriquées

	Séchage			Dégazage			Transfert			Imprégnation		
	t ₁ (h)	T ₁ (°C)	P ₁ (mbar)	t ₂ (mn)	T ₂ (°C)	P ₂ (mbar)	t ₃ (mn)	T ₃ (°C)	P ₃ (mbar)	t ₄ (mn)	T ₄ (°C)	P ₄ (mbar)
VPI 18	> 24	80	20	27	80	20	3	80	20	60	80	20
VPI 20	>72	80	20	74	80	20	1	80	20	69	80	20
VPI 21	>24	80	20	70	80	20	9	80	20	82	80	20
VPI 22	>24	80	20	23	80	2,5 x 10 ⁻⁴	10	80	20	4	80	20
VPI 23	>48	80	2,5 x 10 ⁻⁴	23	80	3 x 10 ⁻³	6	80	20	120	80	20
VPI 24	73	80	2,5 x 10 ⁻⁴	16	70	20	5	70	20	55	70	20
VPI 25	>48	80	2,5 x 10 ⁻⁴	21	80	20	4	80	20	13	89	20
VPI 26	72	80	2,5 x 10 ⁻⁴	15	80	20	3	83	20	64	83	20
VPI 27	72	80	2,5 x 10 ⁻⁴	40	74	20	3	74	120	60	74	120
VPI 28	>65	80	2,5 x 10 ⁻⁴	24	80	120	5	80	120	40	80	120
Prototype 1	>48	80	20	60	80	20	12	80	20	72	78	20
Prototype 10	>68	80	20	75	80	20	15	80	20	60	88	20
Prototype 11	49	80	20	68	80	20	5	80	20	60	91	20
Prototype 12	>25	80	20	128	80	20	15	80	20	75	80	20

La pression appliquée en autoclave pendant les cycles de polymérisation est de 5 bar pour tous les condensateurs

ANNEXE III

HISTOGRAMMES DE MESURE DE DÉCHARGES PARTIELLES DES CONDENSATEURS IMPRÉGNÉS PAR PROCÉDÉ VPI

Cette annexe présente les histogrammes de décharges partielles mesurées sur les bobines VPI 18, VPI 20, VPI 21, VPI 23, VPI 25 et VPI 27 testés à une tension cible de 1,5 kV.

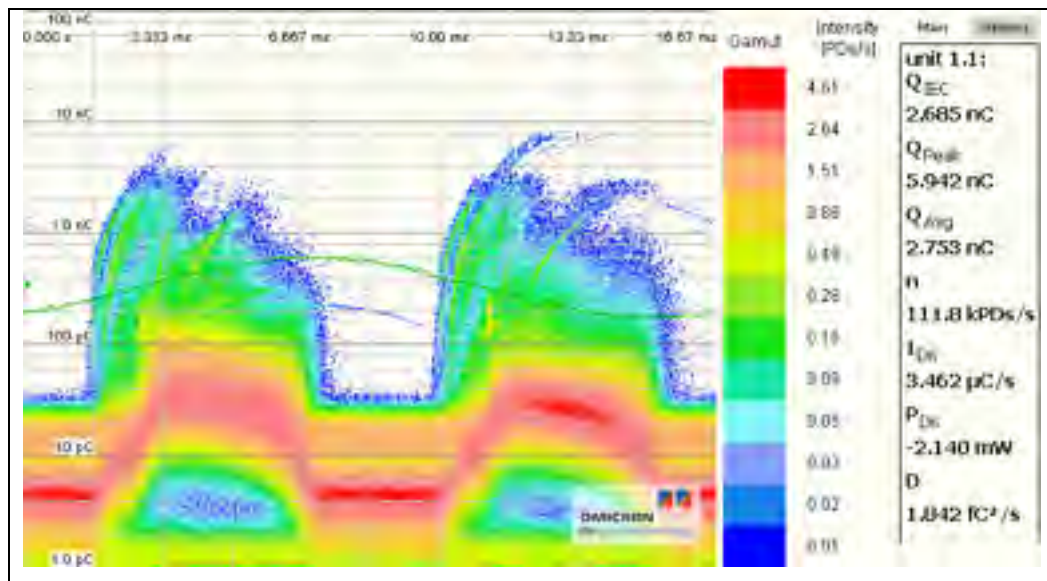


Figure-A III-1 Mesures de décharges partielles de VPI 18 à $U_{nominale} = 1,5$ kV
Le bruit de fond du montage avant mesure est inférieur à 6 pC

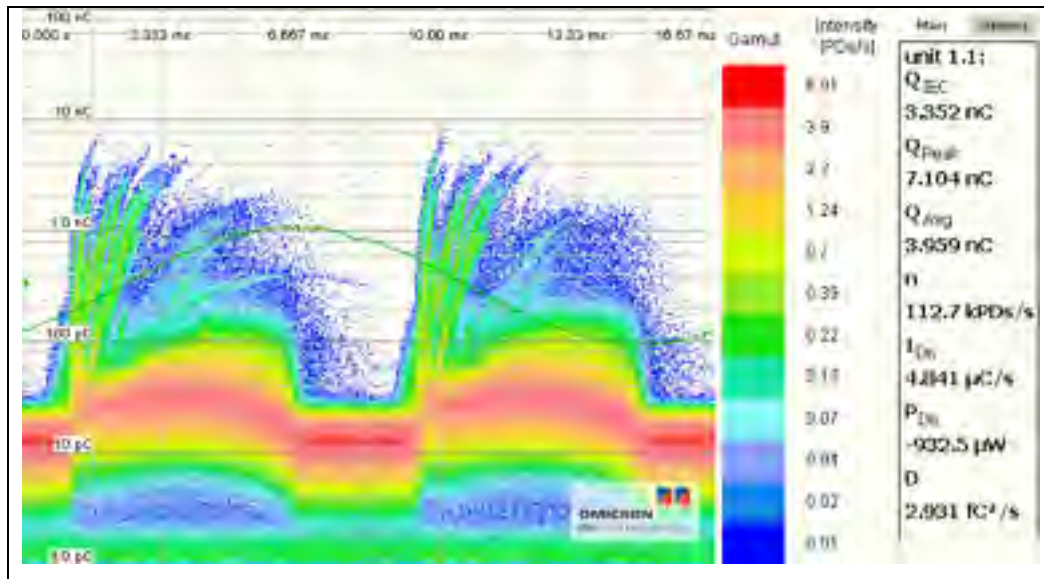


Figure-A III-2 Mesures de décharges partielles de VPI 20 à $U_{nominale} = 1,5$ kV
Le bruit de fond du montage avant mesure est inférieur à 6 pC

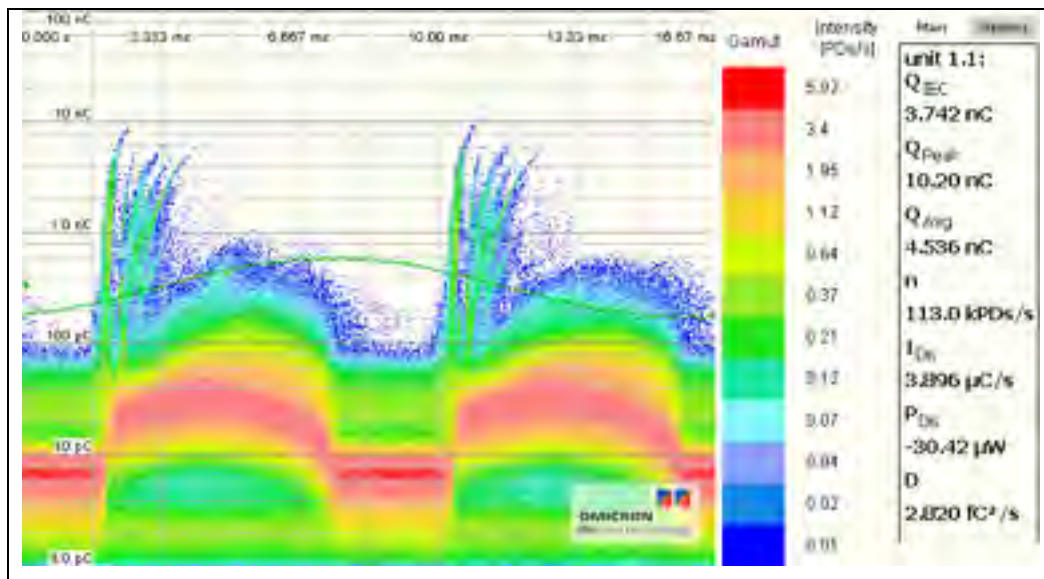


Figure-A III-3 Mesures de décharges partielles de VPI 21 à $U_{nominale} = 1,5$ kV
Le bruit de fond du montage avant mesure est inférieur à 9 pC

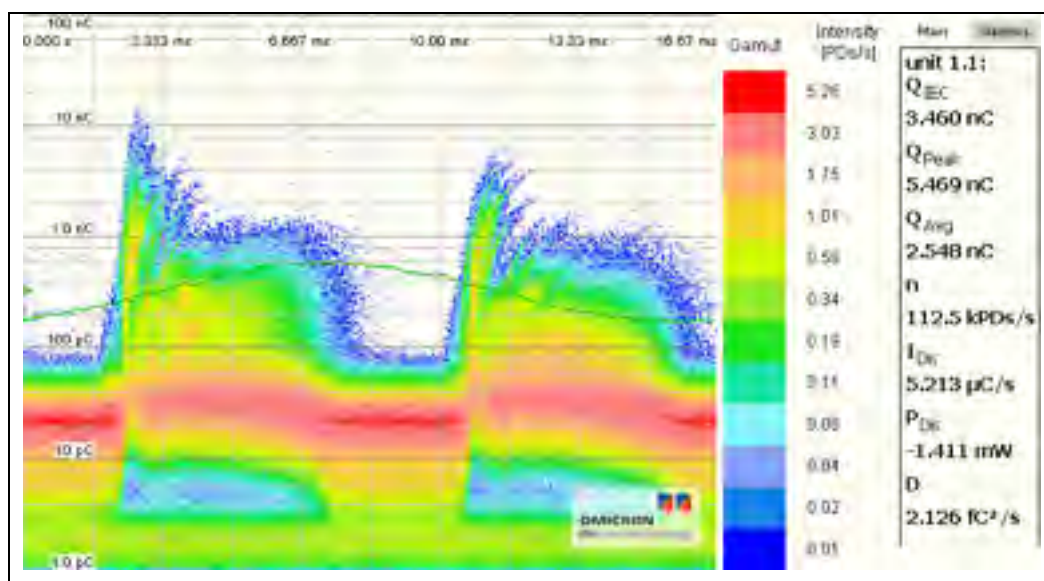


Figure-A III-4 Mesures de décharges partielles de VPI 23 à $U_{nominale} = 1,5$ kV
Le bruit de fond du montage avant mesure est inférieur à 9 pC

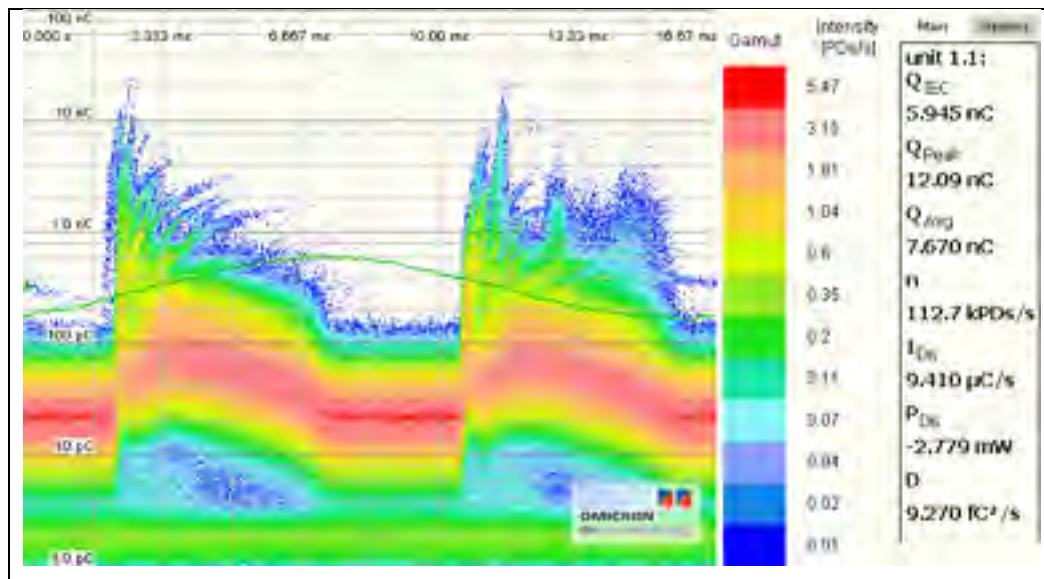


Figure-A III-5 Mesures de décharges partielles de VPI 25 à $U_{nominale} = 1,5$ kV
Le bruit de fond du montage avant mesure est inférieur à 8 pC

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- American Society for Testing and Material. (2013). *Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies*. Norme ASTM D149. In: American Society for Testing and Material.
- American Society for Testing and Material. (2014). *Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry*. Norme ASTM-E1356. In. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Material.
- Bartnikas, R., & Eichhorn, R. M. (1983). *Engineering Dielectrics* (Vol. IIA). Philadelphie, USA: ASTM Special Technical Publication 783.
- Beauger, A., Haussonne, J.-M., & Niepce, J.-C. (2007). Condensateurs. *Techniques de l'ingénieur Matériaux pour l'électronique et dispositifs associés, base documentaire : TIB271DUO*(ref. article : e1925).
- Boggs, S. A., Ho, J., & Jow, T. R. (2010). Overview of laminar dielectric capacitors. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 26(2), 7-13. doi:10.1109/MEI.2010.5482550
- Bureau, J.-M. (2016). Propriétés diélectriques des polymères. *Techniques de l'ingénieur Matériaux pour l'électronique et dispositifs associés, base documentaire : TIB271DUO*(ref. article : e1850).
- Condis. (2019). *Partial discharge Expert System* Document inédit, Condis, Rossens, Suisse.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2002). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis* (4th ed.). Danvers, MA: Wiley.
- Couderc, H., David, E., Corlu, Y., Fréchette, M., & Savoie, S. (2011, 5-8 June 2011). *Dielectric breakdown of amorphous and semicrystalline polymers*. Paper presented at the 2011 Electrical Insulation Conference (EIC).
- David, É. (2010a). Matériaux diélectriques : Chapitre 3 - Propriétés diélectriques statiques. In *Notes du cours SYS-862 Matériaux diélectriques*. Montréal, Québec: École de Technologie Supérieure.
- David, É. (2010b). Matériaux diélectriques : Chapitre 4 - Diélectrique soumis à un champ variable. In *Notes du cours SYS-862 Matériaux diélectriques*. Montréal, Québec: École de Technologie Supérieure.

- David, É. (2010c). Matériaux diélectriques : Chapitre 5 - Vieillissement et rupture diélectrique. In *Notes du cours SYS-862 Matériaux diélectriques*. Montréal, Québec: École de Technologie Supérieure.
- Fournié, R. (1986). *Les isolants en électrotechnique Concepts et théories* (E. Eyrolles Ed. Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France ed.). Paris, France.
- Gao, L. Y., Tu, D. M., Zhou, S. C., & Zhang, Z. L. (1990). The influence of morphology on the electrical breakdown strength of polypropylene film. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 25(3), 535-540. doi:10.1109/14.55728
- Gurit Guide to Composites. In Gurit (Ed.).
- Hantouche, C. (1996). Condensateurs de puissance. *Techniques de l'ingénieur Problématiques communes des réseaux électriques : ingénierie, base documentaire : TIB267DUO*(ref. article : d4710).
- Heid, T. (2015). *Innovative nanostructured epoxy composites for enhanced high voltage insulation systems*. Ecole de Technologie Supérieure de Montréal, Montréal.
- 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*, 83, 236-269. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.05.001>
- IEEE Dielectric and Electrical Insulation Society. (2005). *IEEE Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Breakdown Data*. Norme IEEE Std 930. In Piscataway, NJ: IEEE Dielectric and Electrical Insulation Society.
- IEEE Dielectric and Electrical Insulation Society. (2014). *IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery*. Norme IEEE Std 1434. In New York, NY: IEEE Dielectric and Electrical Insulation Society.
- James, R. E., & Su, Q. (2008). Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment. In: Institution of Engineering and Technology.
- Jonscher, A. K. (1983). *Dielectric Relaxation in Solids*. London: Chelsea Dielectrics Press Ltd.
- 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, 594-601. doi:<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.07.081>

- Karadjian, M. (2018). *Endurance and dielectric strength of electrical cable insulation for aeronautics*. Université Paris-Saclay, Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02015343> (2018SACLC104)
- Kuffel, E., Zaengl, W. S., & Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering*. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann.
- Mouriès, G. (2007). Condensateurs utilisés en électronique de puissance. *Techniques de l'ingénieur Composants passifs et transformateurs statiques, base documentaire : TIB246DUO*(ref. article : d3010).
- Natrass, D. A. (1988). Partial discharge measurement and interpretation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 4(3), 10-23. doi:10.1109/57.830
- Qi, L., Petersson, L., & Liu, T. (2014). Review of Recent Activities on Dielectric Films for Capacitor Applications. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 4(1), 1-6. doi:10.5370/JICEE.2014.4.1.001
- Reed, C. W. (2013). Polymer Nanodielectrics-Basic Concepts. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 29(6), 12-15. doi:10.1109/MEI.2013.6648748
- Reed, C. W., & Cichanowskil, S. W. (1994). The fundamentals of aging in HV polymer-film capacitors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1(5), 904-922. doi:10.1109/94.326658
- Samuel, J. G. C., Lucas, G., Fu, M., Howard, P. J., & Lafon-Placette, S. (2012, 4-7 Sept. 2012). *Nano-dielectrics research for application to high voltage insulation systems*. Paper presented at the 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC).
- 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), 862-868. doi:10.1109/94.740768
- Teyssedre, G., & Boudou, L. (2010). Polymères et composites pour l'électrotechnique. *Techniques de l'ingénieur Matériaux isolants en électrotechnique, base documentaire : TIB255DUO*(ref. article : d2335).
- 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*, 398, 012054. doi:10.1088/1742-6596/398/1/012054

- Wolter, K. D., Johnson, J. F., & Tanaka, J. (1978). Degradation Product Analysis for Polymeric Dielectric Materials Exposed to Partial Discharges. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, *EI-13*(5), 327-336. doi:10.1109/TEI.1978.298138
- Yasufuku, S., Umemura, T., Ishioka, Y., & Yasuda, Y. (1977, 26-29 Sept. 1977). *Chemical and dielectric properties of oil-impregnated all polypropylene film power capacitor insulation system*. Paper presented at the 1977 EIC 13th Electrical/Electronics Insulation Conference.
- Yoshida, Y., & Nishimatsu, M. (1986). Power Capacitors. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, *EI-21*(6), 963-973. doi:10.1109/TEI.1986.349010