

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
Département d'Électrotechnique

Université d'Artois  
Laboratoire Systèmes Électrotechniques et  
Environnement

LSEE   
Laboratoire Systèmes Electrotechniques  
et Environnement



UNIVERSITÉ D'ARTOIS

MÉMOIRE DE PROJET DE FIN D'ÉTUDES

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Électrotechnique

---

# Vieillessement des systèmes d'isolation électrique : expérimentation et prédiction à l'aide de l'IA

---

*Réalisé par*  
Melle. Nesrine DJEDDOU

*Encadré par*  
M. Fabrice MORGANTI  
M. Stéphane DUCHESNE  
M. Madjid TEGUAR

*Présenté et soutenu publiquement le 4 juillet 2024, devant le jury composé de :*

M.Abdlouahab MEKHALDI	Professeur	ENP	Président
M. Fabrice MORGANTI	MCF HDR	Univ d'Artois	Promoteur
M. Stéphane DUCHESNE	Professeur	Univ d'Artois	Promoteur
M. Madjid TEGUAR	Professeur	ENP	Promoteur
M.Youcef BENMHAMED	Docteur	ENP	Examinateur

ENP 2024



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE  
POLYTECHNIQUE  
Département d'Électrotechnique  
Université d'Artois  
Laboratoire Systèmes  
Électrotechniques et Environnement



UNIVERSITÉ D'ARTOIS

MÉMOIRE DE PROJET DE FIN D'ÉTUDES  
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Électrotechnique

# Vieillessement des systèmes d'isolation électrique : expérimentation et prédiction à l'aide de l'IA

Réalisé par  
Melle. Nesrine DJEDDOU

Encadré par  
M. Fabrice MORGANTI  
M. Stéphane DUCHESNE  
M. Madjid TEGUAR

Présenté et soutenu publiquement le 4 juillet 2024, devant le jury composé de :

M. Abdelouahab MEKHALDI	Professeur	ENP	Président
M. Fabrice MORGANTI	MCF HDR	Univ d'Artois	Promoteur
M. Stéphane DUCHESNE	Professeur	Univ d'Artois	Promoteur
M. Madjid TEGUAR	Professeur	ENP	Promoteur
M. Youcef BENMHAMED	Docteur	ENP	Examineur

ENP 2024

**ملخص:** درسنا في هذا العمل تقادم أنظمة العزل الكهربائي. لهذا الغرض، تم استخدام عينات ملتوية معيارية من الأسلاك النحاسية المصقولة قطرها 1,25 مم و0,5 مم. لكل عينة اختبار، تم قياس جهد ظهور التفريغ الجزئي عند التردد الصناعي. ثم تم إجراء التقادم عن طريق تطبيق جهد الانهيار. بالإضافة إلى ذلك، تم رصد الاختلافات في مؤشرات التقادم الأخرى، وهي السعة والمقاومة وعامل التبديد، على نطاق تردد واسع، قبل التقادم وبعده. هذا وقد تم إجراء تحليل مجهري للكشف عن التغيرات الداخلية والسطحية في نظام العزل الكهربائي بعد التقادم. وأخيراً، تم تحديد العلاقة بين هذه المؤشرات والعمر الافتراضي متبوعاً بتنبؤ هذا الأخير باستخدام الذكاء الاصطناعي. ولأجل هذا استعملنا نموذجين ذكيين هما SVR و XGBoost.

**الكلمات المفتاحية:** التقادم، العزل الكهربائي، العينة الملتوية، مؤشرات التقادم، الارتباط، العمر الافتراضي، التنبؤ، الذكاء الاصطناعي.

**Abstract:** In this work, we studied the ageing of electrical insulation systems. For this purpose, standardised twisted pairs of enamelled copper wires of 1,25 mm and 0,5 mm of diameter, were used. For each pair, the partial discharge onset voltage (PDIV) was measured at industrial frequency. Ageing was then carried out by applying the breakdown voltage. In addition, variations in other indicators of ageing, consisting in the capacitance, the resistance and the dissipation factor, were observed over a wide frequency range, before and after ageing. In addition, microscopic analysis was carried out to detect internal and surface changes in the electrical insulation system after ageing. Finally, a correlation between these indicators and lifetime was established, followed by a prediction of the latter using artificial intelligence. To do this, two intelligent models, namely SVR and XGBoost, were used.

**Keywords:** Ageing, electrical insulation, twisted pairs, ageing indicators, correlation, lifetime, prediction, artificial intelligence.

**Résumé:** Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude du vieillissement des systèmes d'isolation électrique. Pour cela, des éprouvettes torsadées normalisées de fils émaillés en cuivre de 1,25 mm et 0,5 mm de diamètre, ont été utilisées. Pour chaque éprouvette, la tension d'apparition des décharges partielles (TADP) a été relevée à fréquence industrielle. Par la suite, le vieillissement a été réalisé en appliquant la tension de claquage. Par ailleurs, les variations d'autres indicateurs de ce vieillissement, constituant en la capacité, la résistance et le facteur de dissipation, ont été suivies sur une large plage de fréquences, et ce, avant et après vieillissement. En outre, une analyse microscopique a été réalisée pour détecter les changements internes et de surface du système d'isolation électrique après vieillissement. Enfin, une corrélation entre ces indicateurs et la durée de vie, suivie d'une prédiction de cette dernière à l'aide de l'intelligence artificielle, a été établie. Pour cela, deux modèles intelligents, à savoir le SVR et XGBoost, ont été utilisés.

**Mots clés:** Vieillissement, isolation électrique, éprouvette torsadée, indicateurs de vieillissement, corrélation, durée de vie, prédiction, intelligence artificielle.

# Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à Dieu le Tout-Puissant, qui m'a donné le courage, la patience et la volonté nécessaires pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement le Professeur Jean-Philippe LECOINTE, Directeur du LSEE, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire LSEE.

Je suis profondément reconnaissant envers mes encadrants Monsieur Fabrice MORGANTI, Maître de Conférences et Membre du LSEE et Monsieur Stéphane DUCHESNE, Professeur et Directeur Adjoint du LSEE, pour leur encadrement de grande qualité, leur disponibilité, leurs conseils précieux et leur soutien constant qui ont été essentiels à l'avancement de ce projet. Leur humanité et leurs encouragements ont été une source inestimable de motivation.

Un remerciement tout particulier à mon cher enseignant, Monsieur Madjid TEGUAR, Professeur et Directeur du LRE de l'École Nationale Polytechnique (ENP), pour l'honneur de m'avoir encadré durant mon projet de fin d'études. Son soutien constant, ses conseils avisés, ses qualités scientifiques et humaines ont toujours été une source de motivation et de générosité dans la réalisation de ce projet.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer mon projet.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à mes Professeurs d'Électrotechnique de l'ENP pour la richesse et la qualité de leurs enseignements, ainsi que pour leur disponibilité et leurs grands efforts déployés.

Je n'oublierai jamais l'ensemble des doctorants et membres du LSEE, qui ont contribué à entretenir une ambiance de travail agréable et m'ont apporté une aide précieuse. Un merci tout particulier à Asma KALEM, qui m'a aidé à m'intégrer au LSEE et m'a soutenu durant toute ma période de stage.

Enfin, je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet.

# Dédicaces

À mes très chers parents, Dalila et Ali. Sans vos sacrifices et efforts, je ne serais pas ici à présenter ce modeste travail et à exprimer mon profond respect et l'amour que je vous porte.

À mes frères, Islem, Rafik et Mehdi.

À ma chère tante Nawel et à mon cher tonton Lakhdar, pour leur soutien constant tout au long de mon parcours universitaire.

À toutes mes chères amies, Feriel, Farah, Sarah et Sirine.

À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

# Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Liste des symboles

<b>Introduction générale</b>	<b>13</b>
<b>1 État de l'art sur le vieillissement de l'isolation électrique</b>	<b>15</b>
1.1 Introduction	16
1.2 Vieillissement des machines électriques	16
1.2.1 Types de vieillissement sous contraintes liées à la construction des machines électriques	17
1.2.1.1 Contraintes thermiques - loi d'Arrhénius	18
1.2.1.2 Contraintes électromécanique	19
1.2.1.3 Contraintes mécaniques	19
1.2.1.4 Contraintes électriques	19
1.2.1.5 Contraintes environnementales	20
1.3 Systèmes isolants dans les machines électriques	21
1.3.1 Matériaux diélectriques dans une machine électrique basse tension	21
1.3.2 Formes et fonctions de l'isolation électrique	25
1.3.2.1 Isolation entre phases	25
1.3.2.2 Isolation entre phase et terre	26
1.3.2.3 Isolation entre spires	27
1.3.2.4 Classification de l'isolation	27
1.4 Indicateurs de vieillissement des machines électriques	29
1.4.1 Tension d'apparition des DPs	29
1.4.2 Résistance d'isolation (RI)	30
1.4.3 Facteur de dissipation (D) ou $\tan\delta$	31
1.4.4 Capacité d'isolation	32
1.5 Prédiction du vieillissement et l'estimation de la durée de vie des machines électriques par l'IA	33
1.5.1 Introduction à l'intelligence artificielle et au deep learning	33
1.5.2 Modèles d'intelligence artificielle pour la prédiction du vieillissement	34
1.6 Conclusion	36

<b>2</b>	<b>Méthodologies de Mesure et Campagnes de Vieillissement</b>	<b>39</b>
2.1	Introduction . . . . .	40
2.2	Matériaux du système étudié et propriétés . . . . .	40
2.3	Préparation des éprouvettes torsadées . . . . .	40
2.4	Dispositifs d'analyse des indicateurs de vieillissement . . . . .	43
2.4.1	Mesures de Capacité ( $C_p$ ), impédance ( $Z$ ), résistance ( $R_p$ ) et facteur de dissipation ( $D$ ) . . . . .	43
2.5	Mesure de la tension d'apparition des décharges partielles (TADP) . . . . .	45
2.6	Description des tests de vieillissement . . . . .	46
2.7	Mesure de la tension de claquage . . . . .	48
2.8	Analyse microscopique . . . . .	49
2.9	Conclusion . . . . .	50
<b>3</b>	<b>Analyse des données et interprétation des résultats</b>	<b>51</b>
3.1	Introduction . . . . .	52
3.2	Résultats des mesures initiales avant vieillissement . . . . .	52
3.3	Mécanismes des Décharges Partielles et Résultats des Essais de la TADP pour Fils Émaillés . . . . .	55
3.4	Résultats des tests de vieillissement accélérés . . . . .	58
3.5	Valeurs des indicateurs après vieillissement . . . . .	61
3.6	Résultats de la tension de claquage . . . . .	61
3.7	Analyse microscopique des torsades avant et après le vieillissement . . . . .	63
3.8	Mesure de l'épaisseur de l'isolant . . . . .	64
3.9	Capacité des éprouvettes des fils émaillés de 1,25 mm de diamètre de en fonction de la fréquence . . . . .	66
3.10	Facteur de dissipation ( $D$ ) en fonction de la fréquence avant et après le vieillissement électrique . . . . .	69
3.11	Variation de la TADP . . . . .	70
3.12	Capacité des fils émaillés . . . . .	71
3.13	Tension de claquage et durée de vie . . . . .	72
3.14	Analyse de la corrélation entre la TADP et la durée de vie . . . . .	73
3.15	Analyse de la corrélation entre capacité et durée de vie . . . . .	74
3.16	Corrélation entre la tension de claquage et la capacité après vieillissement . . . . .	76
3.17	Loi de puissance inverse et vieillissement électrique . . . . .	77
3.18	Conclusion . . . . .	77
<b>4</b>	<b>Modélisation par intelligence artificielle et perspectives</b>	<b>79</b>
4.1	Introduction . . . . .	80
4.2	Méthodologie . . . . .	80
4.2.1	Bibliothèques et Frameworks Logiciels . . . . .	80
4.2.1.1	Python . . . . .	80
4.2.1.2	Scikit-learn . . . . .	81
4.2.1.3	XGBoost . . . . .	81
4.2.1.4	Support Vector Regression (SVR) . . . . .	81
4.2.2	Vecteur d'entrée . . . . .	82
4.2.3	Technique de traitement des données . . . . .	82

4.2.4	Répartition des données entre les ensembles de formation et de test . . . . .	83
4.2.5	Analyse de la Matrice de Corrélacion . . . . .	85
4.2.6	Évaluation des performances . . . . .	86
4.2.7	Analyse comparative des performances de modèle SVR . . . .	87
4.2.8	Comparaison des performances entre SVR et XGBoost . . . . .	87
4.3	Distribution des Résidus . . . . .	88
4.4	Conclusion . . . . .	90
	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>91</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>93</b>

# Table des figures

1.1	Répartition des causes de défaillance. . . . .	17
1.2	Représentation graphique des divers phénomènes impliqués dans la détérioration des isolants en fonction de l'intensité du champ électrique appliqué et de la durée d'exposition à ce champ . . . . .	20
1.3	Application de l'émail sur fil de cuivre . . . . .	22
1.4	Les types d'isolations sur machine tournante. . . . .	25
1.5	l'isolation entre phases d'un bobinage distribué triphasé . . . . .	26
1.6	Changement de TADP (PDIV) des échantillons de paires torsadées avec le vieillissement à haute température et la tension de l'onduleur . . . . .	30
1.7	Modèle d'isolation et diagramme de phase de courant tel que spécifié dans la norme . . . . .	31
1.8	Schéma du pont de Schering pour la mesure du facteur de dissipation. . . . .	32
1.9	Différentes branches de l'apprentissage profond : supervisé, non supervisé et par renforcement . . . . .	33
1.10	Un perceptron multicouche avec une seule couche cachée est un type de réseau de neurones artificiels . . . . .	35
2.1	Machine "TURNS" pour réaliser les éprouvettes torsadées . . . . .	41
2.2	Éprouvette torsadée de 1,25 mm de diamètre . . . . .	42
2.3	Éprouvette torsadée de 0,5 mm de diamètre . . . . .	42
2.4	Machine à dénuder "Abisofix" . . . . .	42
2.5	Analyseur d'impédance Agilent 4980A . . . . .	43
2.6	Analyseur d'impédance Agilent 4294A . . . . .	44
2.7	Mesureur de la TADP . . . . .	45
2.8	Eprouvette testée . . . . .	46
2.9	Schéma électrique du mesureur de TADP . . . . .	46
2.10	Appareil de vieillissement électrique . . . . .	47
2.11	Appareil "break down tester" de mesure de la tension de claquage . . . . .	48
2.12	Microscope Axiocam ERC 5s . . . . .	49
3.1	Courbes de résistance mesurée avec l'analyseur Agilent 4294 sur une large gamme de fréquences allant de 40 Hz à 110 MHz . . . . .	54
3.2	Courbes de la capacité et D mesurées avec l'analyseur Agilent 4294 sur une large gamme de fréquences allant de 40 Hz à 110 MHz . . . . .	54
3.3	Courbes de l'impédance mesurée avec l'analyseur Agilent 4294 sur une large gamme de fréquences allant de 40 Hz à 110 MHz . . . . .	55
3.4	Comportement du champ électrique entre les fils d'une éprouvette avant et après la première DP de l'alternance positive et négative. Vue au niveau de la section d'une éprouvette torsadée [75]. . . . .	56

3.5	Analyse Comparative de la Torsade Avant et Après Vieillessement . .	63
3.6	Épaisseur de l'isolant des fils de différents diamètres avant et après le vieillissement . . . . .	65
3.7	Capacité des fils émaillés mesuré avant le vieillissement à l'aide de l'analyseur Agilent 4890A en fonction de la fréquence . . . . .	66
3.8	Capacité des fils émaillés mesuré avant le vieillissement à l'aide de l'analyseur Agilent 4294A en fonction de la fréquence . . . . .	66
3.9	Variation de capacité en fonction de la fréquence avant et après vieillissement électrique pour un fil émaillé de diamètre 1,25 mm . . . . .	67
3.10	Variations de capacité en fonction de la fréquence avant et après le vieillissement électrique de diamètre 1,25 mm pour les 30 éprouvettes	68
3.11	Variation du facteur de dissipation en fonction de la fréquence avant et après vieillissement électrique pour un fil émaillé de 1,25 mm . . .	69
3.12	TADP pour les éprouvettes de diamètres de 1,25 mm et 0,5 mm . . .	70
3.13	Capacité des échantillons de fils émaillés de différents diamètres à 1 kHz avant vieillissement . . . . .	71
3.14	Courbe de la durée de vie en fonction du tension de claquage . . . .	72
3.15	Régression linéaire entre la TADP et la durée de vie des éprouvettes de 0,5 mm de diamètre . . . . .	73
3.16	Régression linéaire entre la TADP et la durée de vie des éprouvettes de 1,25 mm de diamètre . . . . .	73
3.17	Régression linéaire entre capacité et la durée de vie des éprouvettes de 1,25 mm de diamètre . . . . .	74
3.18	Régression linéaire entre capacité et la durée de vie des éprouvettes de 0,5 mm de diamètre . . . . .	75
3.19	Corrélation entre la Tension de Claquage et la Capacité après Vieillessement pour des Éprouvettes de 1,25 mm de Diamètre. . . . .	76
4.1	Histogramme représentant la distribution des durées de vie des échantillons . . . . .	84
4.2	Matrice de corrélation des variables . . . . .	85
4.3	Comparaison des Prédiction : SVR . . . . .	87
4.4	Histogramme représentant la distribution des durées de vie des échantillons : SVR . . . . .	89
4.5	Histogramme représentant la distribution des erreurs de prédiction des durées de vie des échantillons : XGBoost . . . . .	90

# Liste des tableaux

1.1	Polymères organiques utilisés pour l'émail des fils magnétiques de machines électriques . . . . .	23
1.2	Classes thermiques des isolants . . . . .	28
2.1	Force et nombre des tours pour la confection des éprouvettes torsadées	41
3.1	Valeurs d'indicateurs pour l'analyseur Agilent 4980A . . . . .	53
3.2	Données de la TADP pour les éprouvettes de 1,25 mm . . . . .	57
3.3	Données de la TADP pour les éprouvettes de 0,5 mm . . . . .	57
3.4	Tension de claquage et durée de vie des éprouvettes de diamètre de 1,25 mm . . . . .	59
3.5	Tension de claquage et durée de vie des éprouvettes de diamètre de 0,5 mm . . . . .	60
3.6	Valeurs d'indicateurs après vieillissement . . . . .	61
3.7	Tension de claquage et capacité des éprouvettes de diamètre de 1,25 mm . . . . .	62
3.8	Épaisseurs de l'isolant mesurées avant et après le vieillissement . . .	64
4.1	Répartition des données entre les ensembles de formation et de test .	83
4.2	Comparaison des performances entre SVR et XGBoost . . . . .	88
	ABBREVIATIONS	

# Liste des Abréviations

<b>DP</b>	Décharge Partielle
<b>TADP</b>	Tension Apparition Décharge Ppartielle
<b>RNA</b>	Réseaux Neurones Artificiels
<b>EP</b>	éprouvette
<b>D</b>	facteur de dissipation
<b>ML</b>	Machine Learning
<b>SVR</b>	Support Vector Regression

# Introduction générale

Les machines électriques sont essentielles dans des secteurs variés tels que la production d'énergie, la fabrication industrielle, les véhicules électriques, ainsi que dans les applications domestiques comme les appareils électroménagers. Leur fonctionnement fiable et robuste est crucial pour maintenir l'efficacité des processus industriels et assurer la continuité des opérations. En surveillant activement la performance des machines, il devient possible d'anticiper et d'éviter les défaillances potentielles, réduisant ainsi les interruptions et optimisant leur durée de vie opérationnelle. Cette approche garantit non seulement la fiabilité des systèmes électriques, mais contribue également à la sécurité et à la rentabilité des installations industrielles [1].

Parallèlement à leur rôle essentiel dans divers secteurs industriels, les machines électriques font face à des défis tels que les fluctuations de tension et la dégradation des matériaux isolants du stator. Cela nécessite l'utilisation de techniques avancées de surveillance proactive et de détection des défauts pour garantir leur fiabilité à long terme.

Les fluctuations de tension constituent une préoccupation majeure pour les moteurs à induction dans diverses applications industrielles, pouvant entraîner des dysfonctionnements et des défaillances en l'absence de gestion adéquate. Parallèlement, la détérioration des matériaux isolants du stator constitue un défi critique, influencé par le stress électrique et les variations de température, compromettant la fiabilité à long terme des machines électriques. La détection précoce des défauts d'isolation est donc essentielle pour éviter des arrêts coûteux et maintenir la continuité des opérations industrielles, avec le développement de diverses méthodes de surveillance renforçant la robustesse et la durabilité des systèmes électriques [2, 3].

Pour assurer un fonctionnement continu et efficace, il est crucial de diagnostiquer et de surveiller l'état des matériaux isolants des machines électriques, soumis à diverses contraintes thermiques, électriques, mécaniques et environnementales. La contrainte thermique est particulièrement préoccupante car elle cause une dégradation progressive de l'isolation électrique, pouvant conduire à terme à des défaillances des enroulements [4]. Les méthodes courantes d'évaluation de la durée de vie thermique des machines électriques reposent sur des tests de vieillissement accéléré, nécessitant plusieurs mois pour être complétés. Pour surmonter cette difficulté, des techniques intelligentes permettant de réduire considérablement le temps nécessaire à ces évaluations, ont été développées pour diagnostiquer le vieillissement thermique des systèmes d'isolation électrique [5, 6, 7]. À titre d'exemple, un réseau de neurones feedforward entraîné avec l'algorithme de rétropropagation bayésienne (BRP) a démontré une excellente concordance entre les prédictions et les résultats expérimentaux, tout en réduisant de 1680 heures (57 % du temps de test expérimental). Ces avancées démontrent l'importance d'adopter

des techniques de diagnostic avancées pour améliorer la fiabilité et la durabilité des systèmes électriques [8].

Notre travail se concentre sur l'étude du vieillissement des systèmes d'isolation électrique. Nous avons utilisé des éprouvettes torsadées normalisées de fils de cuivre émaillés de différents diamètres (1,25 mm et 0,5 mm). Pour chaque éprouvette, nous avons mesuré la tension d'apparition des décharges partielles (TADP) à fréquence industrielle, puis appliqué la tension de claquage pour provoquer le vieillissement. Nous avons également suivi les variations de la capacité, de la résistance et du facteur de dissipation diélectriques des éprouvettes sur une large gamme de fréquences, avant et après le vieillissement. En vue de lier les variations de ces paramètres au processus de dégradation et de déformation du système d'isolation électrique, une analyse microscopique a été effectuée. Enfin, nous avons établi une corrélation entre ces indicateurs et la durée de vie, et avons utilisé l'intelligence artificielle, avec les modèles SVR et XGBoost, pour prédire cette durée de vie.

Notre mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre débute par une étude approfondie de la dégradation des isolants dans les machines électriques, ainsi que des modèles de vieillissement disponibles.

Le deuxième chapitre présente en détail les méthodologies expérimentales et les équipements utilisés pour mesurer les indicateurs de vieillissement des systèmes d'isolation électrique.

Le troisième chapitre expose les résultats expérimentaux et leur interprétation, en mettant particulièrement l'accent sur l'analyse des relations entre différents indicateurs de vieillissement et la durée de vie des fils émaillés.

Le quatrième et dernier chapitre met en œuvre des techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique pour prédire la durée de vie de chaque éprouvette torsadée à partir de des indicateurs spécifiques du vieillissement. A cet effet, deux modèles intelligents ont été employés à savoir SVR et XGBoost, dans un environnement Python. La conclusion générale résume l'ensemble de notre travail, mettant en lumière les principaux résultats obtenus. Nous terminons par présenter certaines perspectives pour des travaux de recherche futurs.

## **Chapitre 1**

# **État de l'art sur le vieillissement de l'isolation électrique**

## 1.1 Introduction

La fiabilité des machines électriques repose en grande partie sur l'intégrité de l'isolation électrique des bobinages statoriques. Des études révèlent que 56% des pannes des machines électriques industrielles proviennent de dommages à l'isolation électrique [9], mettant en évidence son importance critique. Alors que la maintenance préventive peut réduire les défaillances mécaniques, elle ne peut pas toujours prévenir les problèmes d'isolation qui nécessitent une attention particulière. Investir dans une isolation de qualité et suivre des procédures de maintenance rigoureuses sont donc essentiels pour garantir la longévité et la performance optimale des machines électriques [10].

Le vieillissement des systèmes d'isolation est un processus complexe qui peut être défini comme la détérioration progressive des matériaux isolants utilisés dans les machines électriques au fil du temps, en raison de divers facteurs tels que les contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales [11]. Dans ce contexte, ce chapitre se concentre sur une étude de la dégradation des isolants dans les machines électriques, ainsi que sur l'examen des divers modèles de vieillissement des systèmes d'isolation. Nous explorons les différents types de vieillissement liés à la construction des machines électriques, ainsi que les systèmes isolants utilisés dans ces machines. De plus, nous analysons les indicateurs clés de vieillissement des machines électriques, en mettant un accent particulier sur leur utilisation dans le cadre de l'intelligence artificielle (IA) pour la prédiction du vieillissement et l'estimation de la durée de vie des machines électriques.

## 1.2 Vieillissement des machines électriques

Le processus de vieillissement des machines électriques et de leurs composants est caractérisé par une évolution progressive qui altère leur capacité à fonctionner sans risque de défaillance. Avec le temps, il peut arriver que certains éléments subissent une défaillance totale ou partielle, atteignant ainsi un stade critique de vieillissement [12].

Ces défaillances peuvent être regroupées en deux catégories principales à savoir les problèmes mécaniques et les dysfonctionnements électriques. Les problèmes mécaniques englobent divers défauts tels que les roulements défectueux, les déséquilibres statiques ou dynamiques du rotor, ainsi que les mouvements inattendus des bobinages et des tôles, entraînant des vibrations excessives [13]. Quant aux défaillances électriques, elles sont souvent liées à des ruptures au niveau des barres rotoriques des machines, à des problèmes d'isolation des bobinages et à des courts-circuits entre les tôles magnétiques, créant ainsi des points chauds [14].

Une étude statistique réalisée par Thomson et ses collègues [15, 16] a révélé des tendances significatives en matière de pannes électriques, comme illustré sur la figure 1.1.

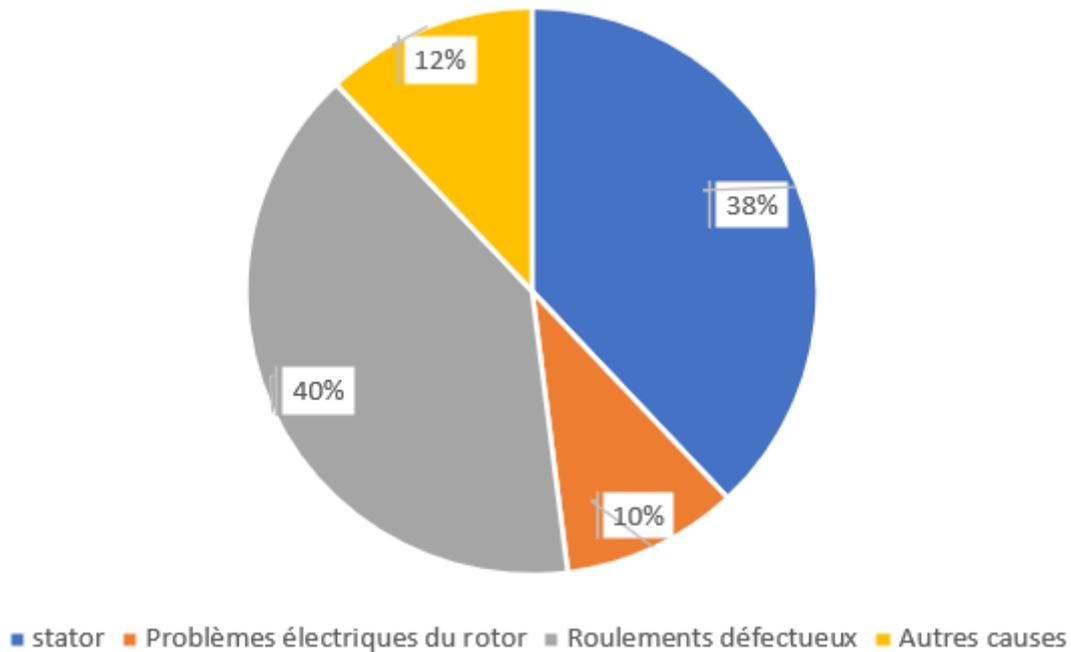


FIGURE 1.1 – Répartition des causes de défaillance.

Parmi ces pannes, les problèmes électriques touchant les bobinages statoriques ont été les plus fréquents [17, 18]. Ainsi, dans les discussions sur le vieillissement des machines électriques, une attention particulière est souvent accordée à l'état de l'isolation électrique de ces bobinages.

### 1.2.1 Types de vieillissement sous contraintes liées à la construction des machines électriques

Pendant le processus de test, certains chercheurs ont introduit certaines contraintes pour tester les enroulements, afin de causer un vieillissement de l'isolation. Les principaux types de contraintes qui impactent l'isolation des enroulements dans les machines électriques sont expliqués dans cette section. Les températures atteintes dans des conditions de fonctionnement sont principalement responsables de ces contraintes.

Les contraintes résultant de l'isolation peuvent être regroupées en deux catégories en l'occurrence constantes et transitoires. Dans les contraintes constantes, le temps nécessaire pour atteindre la défaillance dépend du temps de fonctionnement de la machine électrique. En revanche, lorsque la défaillance est provoquée par des contraintes transitoires, le temps de défaillance dépend du nombre de transitoires subis par la machine électrique. Ces contraintes peuvent être classées en quatre groupes décrits ci-après [19] :

### 1.2.1.1 Contraintes thermiques - loi d'Arrhénius

Les températures élevées dans le matériau d'isolation provoquent des contraintes thermiques, ce qui provoque l'oxydation et fragilise l'isolation des machines électriques. Les machines qui travaillent au-delà des seuils de température maximale du matériau peuvent subir des altérations, comme le délaminage des parois de bobine. Cependant, ces températures élevées peuvent aussi avoir des avantages, comme favoriser le gonflement de l'isolation, réduire les dimensions des poches d'air et réduire l'activité de décharge partielle. Dans le contexte des véhicules électriques, la température augmente en raison des pertes Joule dans le cuivre et des courants de Foucault dans le stator. La gestion thermique devient cruciale, car une défaillance peut résulter d'une surchauffe. Le vieillissement de la peau entraîne des modifications matérielles, des réactions chimiques, des fissures thermomécaniques et des ajustements de la répartition du stress électrique. Dans ce contexte exigeant, il est essentiel d'avoir un système de refroidissement efficace pour éviter les défaillances prématurées des systèmes d'isolation électrique.

La loi d'Arrhenius décrit le taux d'oxydation lorsqu'il y a une réaction chimique de premier ordre. Cet effet indique comment les températures affectent les constantes d'équilibre dans les réactions chimiques. Pour les tests de vieillissement, il est possible de calculer cette relation en utilisant l'équation (1.1). La vie thermique de l'isolation solide est représentée par cette équation :

$$L = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (1.1)$$

L est la durée de vie de l'isolation est indiquée par l'équation (1.1), A est une constante déterminée par le test, B est une constante  $\frac{-E_a}{k}$  tel que  $E_a$  est l'énergie d'activation (eV) et k est la constante de Boltzmann ( $8,617 \cdot 10^{-5}$  eV/K), T est la température en Kelvin. Cette équation est utile pour corréliser le temps à une température de fonctionnement avec le temps à une température de test différente. La règle de Van't Hoff, qui stipule qu'une augmentation de 10°C entraîne généralement une diminution d'environ 50% de la durée de vie de l'isolation, est dérivée de l'équation d'Arrhenius. C'est une approximation pratique qui nous permet d'estimer l'effet de la température sur la durée de vie des matériaux isolants. Toutefois, chaque matériau d'isolation a une température de fonctionnement minimale, et la dégradation de l'isolation en dessous de ce seuil est peu significative. Ces limites de température sont indiquées par les classifications thermiques de l'isolation [20]. La durée de vie de l'isolation (1.1) peut être exprimée de manière linéaire en prenant en considération les deux côtés de la façon suivante [8] :

$$\log_{10}L = \log_{10}A + (\log_{10}e)\frac{B}{T} \quad (1.2)$$

Donc, on dispose d'une équation linéaire pour représenter et modéliser la relation entre la durée de vie de l'isolation et la température.

$$Y = A_1 X + B_1 \quad (1.3)$$

avec :  $Y = \log_{10} L$

$X = 1/T$

$A_1 = (\log_{10} e) \cdot B$

$B_1 = \log_{10} A$

Comme limitations l'équation (1.3) ne s'applique qu'aux températures relativement élevées et peut être modélisée avec plus d'une équation. De plus, le procédé chimique n'est pas entièrement réalisable dans un système de premier ordre [21]. En outre, il convient de noter que l'équation ne capture que les points qui sont linéaires.

### 1.2.1.2 Contraintes électromécanique

Il arrive souvent que cette contrainte se traduise par une maximisation du couple volumique de la machine. L'optimisation du couple de volume conduit à une augmentation des pertes de volume. Il est nécessaire de soumettre la machine à des températures plus élevées [22].

### 1.2.1.3 Contraintes mécaniques

Les forces électromagnétiques présentes dans le moteur sont souvent responsables des contraintes mécaniques. Ces forces ont pour effet de provoquer des vibrations au sein des enroulements. De cette manière, l'isolation est exposée à des frottements mécaniques qui accélèrent le processus de vieillissement. Les systèmes isolants sont soumis à des contraintes de cisaillement et de compression en raison de la force électromagnétique proportionnelle au carré du courant dans le stator [23]. En plus de l'effet thermique direct induits par les démarrages excessifs de la machine, ces derniers provoquent une augmentation significative et cyclique de la température dans le cuivre. Les dilatations et les contraintes répétitives sur l'isolant peuvent causer des fissures et déclencher un court-circuit interne [24].

### 1.2.1.4 Contraintes électriques

Le vieillissement des machines électriques est un phénomène complexe qui dépend de plusieurs facteurs, dont les contraintes électriques jouent un rôle crucial. La fréquence électrique est particulièrement importante pour les machines de puissance inférieure à 1000 V, car elle peut causer des décharges partielles (DPs) dans l'isolation.

Les DPs sont de petites étincelles électriques qui se produisent dans l'isolation lorsqu'elle est soumise à un champ électrique élevé. Elles fragilisent l'isolation et réduisent sa durée de vie. L'impact du champ électrique est souvent décrit par la loi de puissance inverse, largement utilisée dans les normes industrielles telles que le groupe FIDES [25] et la norme CEI-34 [26] sur les isolants des machines électriques. Cette loi est modélisée par l'équation :

$$L = c * E^{-n} \quad (1.4)$$

Dans cette équation, E représente le niveau de champ électrique causé. En plus des DPs, la tension électrique appliquée aux machines électriques affecte également le vieillissement de leurs composants. L'augmentation de la tension accélère la détérioration des propriétés diélectriques des matériaux, ce qui peut entraîner des défaillances prématurées [27].

Ces contraintes électriques peuvent entraîner plusieurs types de dégradations de l'isolation, comme la rupture électromécanique, la rupture par effet thermique et la rupture par décharges électriques. Ces dégradations peuvent être précédées par un vieillissement électrique du matériau, lui-même causé par des phénomènes tels que l'arborescence électrique, l'arborescence humide et les décharges partielles [28, 29], comme illustré sur la figure 1.2.

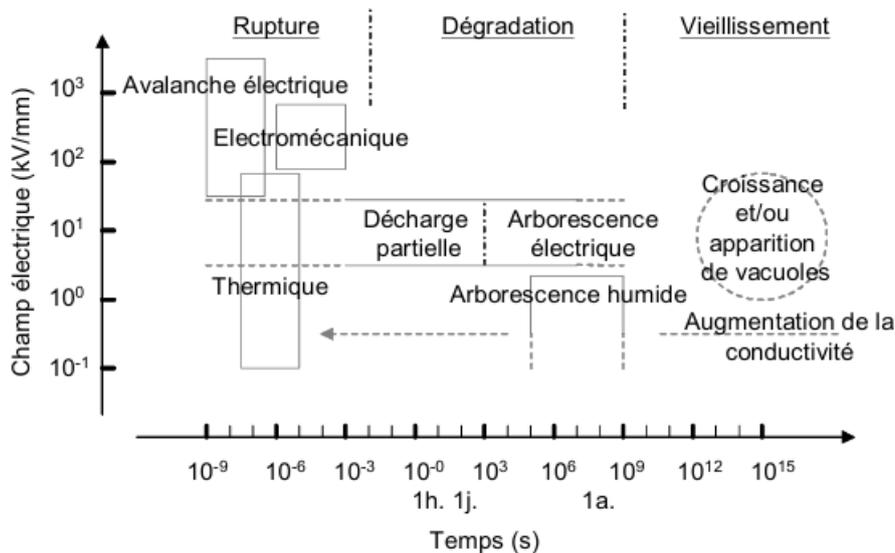


FIGURE 1.2 – Représentation graphique des divers phénomènes impliqués dans la détérioration des isolants en fonction de l'intensité du champ électrique appliqué et de la durée d'exposition à ce champ.

### 1.2.1.5 Contraintes environnementales

Les machines jouent également un rôle crucial dans leur environnement physico-chimique. La présence de diverses substances polluantes dans l'environnement des machines électriques, notamment l'oxygène de l'air et l'humidité, peut souvent provoquer des réactions chimiques qui compromettent la qualité de l'isolation et causent un défaut d'enroulement [19, 30].

L'une des réactions implique la formation d'ozone et d'oxyde d'azote, qui s'associent avec l'humidité pour fabriquer des acides nitriques, qui attaquent l'isolation [31]. Les polluants les plus fréquemment cités sont [19, 32, 33] :

- l'humidité, surtout lorsqu'elle est abondante en sel (comme dans les installations offshore);

- l'huile ou la graisse provenant des roulements ou des systèmes de refroidissement;

- les substances chimiques agressives déjà présentes dans l'environnement de la machine ou issues de la dégradation de l'isolation;

- Les particules abrasives, comme la poussière métallique, celles provenant des systèmes de freinage et les résidus de balais en charbon.

Chacun de ces facteurs peut affecter l'isolation du rotor ou du stator de manière différente. Dans certains cas, ces facteurs d'influence ne posent pas de problème en eux-mêmes. Cependant, lorsqu'ils sont associés à d'autres paramètres, ils peuvent causer une dégradation de l'isolation. Par exemple, si l'humidité et l'huile sont associées à des sels partiellement conducteurs ou à des particules de poussière métallique, cela peut former un film partiellement conducteur à la surface de l'isolant, qui génère ensuite des courants de surface en raison du champ électrique.

## 1.3 Systèmes isolants dans les machines électriques

### 1.3.1 Matériaux diélectriques dans une machine électrique basse tension

Il existe différentes formes d'isolations électriques dans une machine électrique, telles que l'émail, le papier isolant, les rubans adhésifs et la résine d'imprégnation. En fonction de l'usage prévu, la partie isolante est fabriquée en utilisant un matériau qui assure son bon fonctionnement tout au long de sa durée de vie attendue [34].

Par exemple, l'émail de cuivre est la première couche qui isole le conducteur de l'extérieur. Le vernis d'émaillage se compose d'un solvant, d'un pré-polymère, d'un système de réticulation et d'additifs [35]. Il est déposé en plusieurs couches sur le fil de cuivre, comme le montre la figure 1.3.

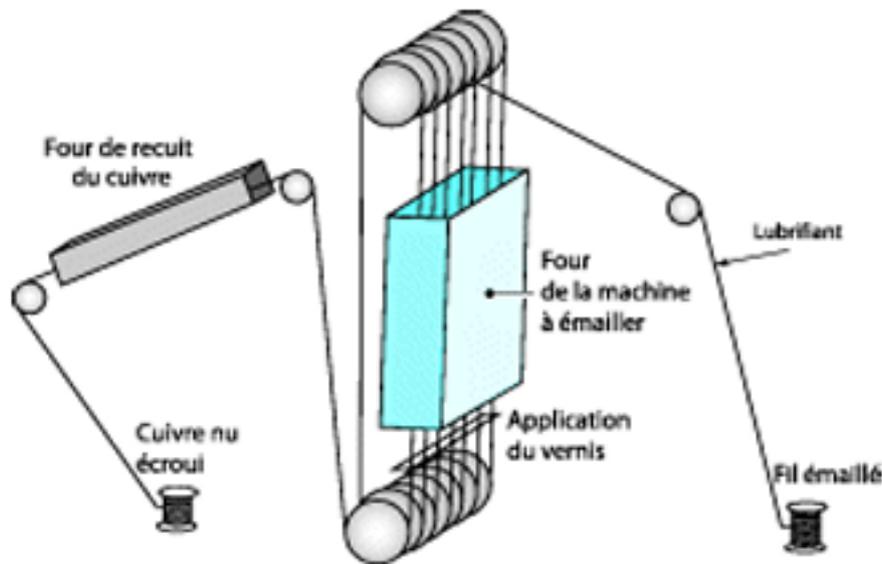


FIGURE 1.3 – Application de l'émail sur fil de cuivre [36].

Les matériaux fréquemment utilisés pour l'émail comprennent le polyéthér-imide (PEI), le polyamideimide (PAI) et le polyimide (PI). Ces matériaux présentent des propriétés mécaniques, des résistances chimiques et des durées de vie thermiques variées. Lorsque ces matériaux sont utilisés dans des applications électriques, il est essentiel de prendre en compte leur capacité à résister à la chaleur, car ils peuvent être exposés à des températures élevées en raison du courant électrique qui les traverse. C'est là qu'intervient l'indice de température, une mesure clé pour évaluer leur performance thermique.

L'indice de température détermine la température maximale à laquelle un matériau peut être exposé en continu sans subir de dommages significatifs ou altérations de ses propriétés physiques ou chimiques. Plus cet indice est élevé, plus le matériau est capable de supporter des températures élevées sans se dégrader. Ainsi, les concepteurs et les ingénieurs doivent choisir des matériaux isolants avec des indices de température adaptés aux conditions de fonctionnement prévues de leurs équipements électriques. Les informations fournies dans le tableau 1.1 sur les indices de température des matériaux sont donc essentielles pour cette sélection, garantissant ainsi la fiabilité et la durabilité des équipements électriques.

En parallèle de l'indice de température, il existe trois grades principaux de fils isolants, chacun étant classé selon ses performances thermiques et mécaniques. Ces grades permettent de déterminer l'application la plus appropriée pour chaque type de fil, en tenant compte des exigences spécifiques en matière de résistance à la chaleur, à l'humidité et aux contraintes mécaniques. Ces classifications, combinées aux indices de température, permettent aux ingénieurs de faire des choix éclairés pour optimiser la performance et la durabilité des systèmes électriques [34].

TABLE 1.1 – Polymères organiques utilisés pour l'émail des fils magnétiques de machines électriques [37, 38].

Nom du matériau	Nom abrégé	Indice de température	Spécificités
Polyuréthane	PUR	155	Pas pour applications à courant élevé ou température élevée Soudable
		180	
Polyester	PES	150	Pas bon pour applications à forte humidité
		185	
Polyesterimide	PEI	180	Propriétés thermiques améliorées par rapport au polyester
		200	
Polyamide imide	PAI	200	Résistant aux hautes températures, bonnes propriétés mécaniques Résistant aux produits chimiques et à l'humidité
		220	
Polyimide	PI	240	Résistant aux hautes températures Résistant en continu aux températures de fonctionnement élevées et aux surcharges sévères intermittentes
Polyimide/Polyamide-imide	PI/PAI	260	Très résistant aux hautes températures
Polyimide nano-chargé	PI	280	

Le papier est fabriqué à partir de feuilles ou de rouleaux qui ont une apparence similaire au papier de cellulose réel. Ils sont habituellement des combinaisons de couches de divers matériaux isolants (souvent désignés par leurs noms commerciaux comme Nomex, Kapton, Mylar). Voici quelques précisions sur ces matériaux [34] :

1-Nomex :

- C'est un méta-aramide.
- Il est résistant aux flammes et à la chaleur (peut supporter des températures allant jusqu'à 370 °C).
- Il possède une bonne résistance chimique.

2-Kapton :

- C'est un film de polyimide.
- Il peut fonctionner dans une large plage de températures (-269 °C à 400 °C).
- Cependant, il manque un peu de durabilité mécanique et vieillit mal lorsqu'il est exposé à l'humidité.

3-Mylar :

- C'est un nom pour le film de polyéthylène téréphtalate (PET).
- Il est caractérisé par une résistance élevée à la traction et une bonne stabilité dimensionnelle et chimique.

Ces matériaux sont couramment utilisés dans les applications d'isolation électrique et thermique

L'émail est habituellement une résine organique. L'incorporation de la résine dans la machine électrique constitue la dernière étape du système d'isolation. Dès que toutes les autres pièces sont installées, le stator est imprégné. Les techniques varient, mais leur principal intérêt est que la résine doit pénétrer tous les espaces dans les fentes de la machine afin de laisser un minimum de zones de bulles d'air. Après avoir été introduite dans la résine, elle devient durcie à une température élevée et se solidifie en conséquence. On utilise généralement trois matériaux principaux pour imprégner les machines basse tension à savoir l'époxyde, le polyester et le polyesterimide. Les produits en polyester sont simples à insérer entre les parties isolantes. En raison de leurs propriétés mécaniques moins bonnes, ils sont plus cassants et ont une faible conductivité diélectrique à haute température. Les liquides à base d'époxy sont plus visqueux, ce qui rend leur introduction dans la machine plus problématique. Ils présentent d'excellentes propriétés mécaniques et une bonne résistance chimique. Les liquides à base de polyesteramides ont des propriétés similaires à celles des produits à base de polyester, mais présentent de meilleures propriétés thermiques à haute température. Les résines contenant des particules micro et nano mélangées présentent des propriétés supplémentaires. Certaines nanoparticules ont été démontrées pour aider à supporter les DP's et à allonger la durée de vie de l'isolation d'un ordre de grandeur. En complément de l'imprégnation, il est possible d'utiliser du fil magnétique auto-collant. Dans cette technologie, le fil de tour-à-tour est recouvert d'une couche supplémentaire de matériau qui se lie avec les tours adjacentes lorsqu'il est chauffé ou soumis à un solvant [39].

### 1.3.2 Formes et fonctions de l'isolation électrique

Pour répondre aux exigences spécifiques du moteur, divers types d'isolations sont mis en œuvre [40]. L'isolation électrique joue un rôle crucial dans le fonctionnement sécurisé et efficace des machines tournantes.

Il existe plusieurs types d'isolations, chacun servant des fonctions spécifiques pour protéger les composants internes des moteurs et prévenir les courts-circuits, les décharges électriques et les pertes d'énergie.

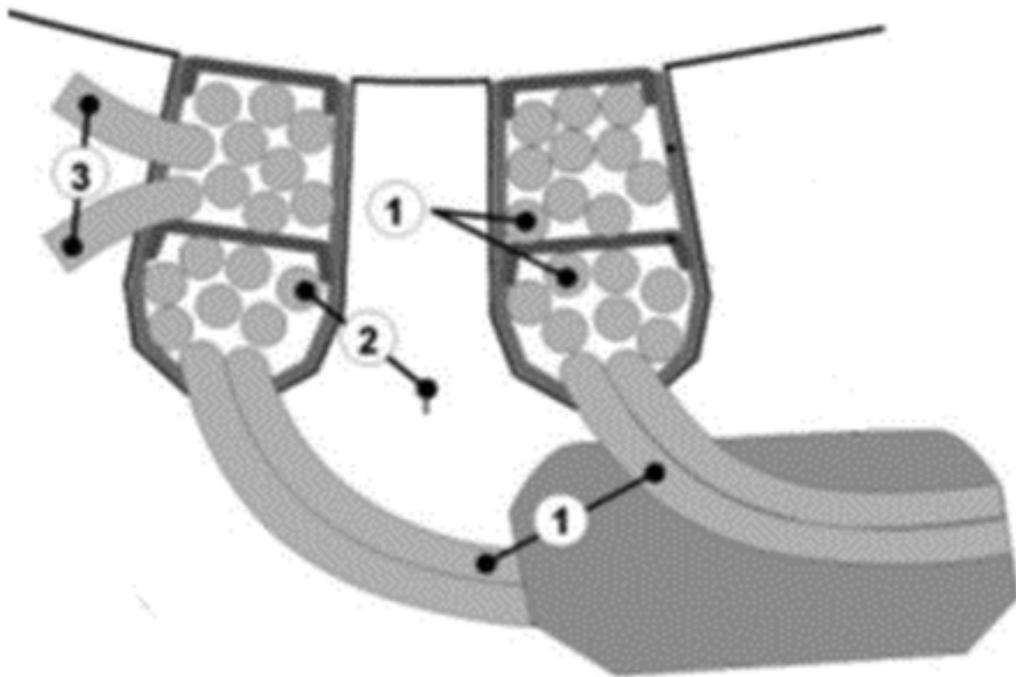


FIGURE 1.4 – Les types d'isolations sur machine tournante  
1 : l'isolation entre phases ; 2 : isolation entre phase et terre ( parfois phase-masse ) ; 3 : isolation entre spires.

#### 1.3.2.1 Isolation entre phases

L'assurance d'une isolation efficace entre phases demeure cruciale pour préserver la séparation entre les différentes phases à l'intérieur d'une machine électrique, comme illustré par le schéma n°1 de la figure 1.4. Dans une configuration triphasée conventionnelle, les phases sont disposées à 120 degrés électriques les unes des autres. Cette disposition génère une disparité significative de potentiel entre les phases, particulièrement lors des intersections dans l'espace des extrémités ou lorsque deux phases distinctes partagent une même fente. Afin de garantir une isolation fiable, les machines à enroulement aléatoire font appel à une bande de séparation de phase et à une doublure de fente [34].

En revanche, dans le cas des machines à enroulement formé basse tension, ces éléments sont souvent négligés. Néanmoins, la souplesse des extrémités dans cette

configuration permet d'assurer un espacement adéquat entre les phases. Cette isolation est ainsi doublement assurée, d'une part par l'émail du fil de cuivre, formant la première barrière entre le conducteur et l'environnement extérieur, et d'autre part, par la combinaison de la résine d'imprégnation et du papier isolant, renforçant cette protection et garantissant la fiabilité et la durabilité globale du système. Un exemple illustrant cette isolation dans un bobinage distribué d'une machine triphasée est visible sur la figure 1.5.



FIGURE 1.5 – l'isolation entre phases d'un bobinage distribué triphasé [39]

### 1.3.2.2 Isolation entre phase et terre

L'isolation entre la phase et la terre, telle qu'indiquée au schéma n°2 de la figure 1.4, est une composante essentielle d'une machine électrique. Cette isolation joue un rôle crucial en raison de sa capacité à résister à des tensions élevées et à des contraintes électriques et mécaniques plus importantes que celles des autres formes d'isolation. Cette isolation empêche les enroulements de toucher le fer du stator, évitant ainsi des courts-circuits potentiellement dangereux. De plus, dans de nombreuses conceptions de moteurs électriques, le stator et le boîtier du moteur ne sont pas séparés, ce qui augmente le risque de court-circuit à la terre.

Pour prévenir de tels risques, il est impératif de disposer d'un système de surveillance des défauts à la terre. Ce système permet de détecter les défauts d'isolation avant qu'ils ne causent des dommages ou des dangers pour l'utilisateur. L'espace entre les fils magnétiques et les parois des fentes du stator est initialement assuré par l'émail recouvrant le fil, et il est ensuite renforcé par une doublure de fente, constituée de papier isolant qui couvre toute la surface de chaque fente.

Ce renforcement garantit une isolation supplémentaire et une protection accrue contre les défaillances électriques [34].

### 1.3.2.3 Isolation entre spires

L'isolation entre spires, comme illustré par le schéma n°3 sur la Figure 1.4, est particulièrement vulnérable en raison de sa minceur. Dans les moteurs électriques basse tension enroulés en vrac, chaque conducteur est soumis à des tensions variables. Lorsque le premier et le dernier conducteur entrent en contact, leur isolation doit résister à la tension totale de la bobine. C'est pourquoi l'émail et la résine d'imprégnation jouent un rôle crucial pour assurer cette isolation indispensable. Une défaillance de cette isolation peut rapidement conduire à des pannes plus graves. Les recherches actuelles se concentrent sur le comportement diélectrique de l'isolation entre les spires, visant à améliorer la performance et la durabilité des matériaux isolants face aux contraintes électriques et thermiques [34].

### 1.3.2.4 Classification de l'isolation

La classification des isolants repose principalement sur leurs limites thermiques, étant donné que les performances et les propriétés physiques de ces matériaux sont directement influencées par la température de fonctionnement. À mesure que la température augmente, le taux de dégradation chimique des propriétés diélectriques s'accélère, ce qui peut sérieusement compromettre la durée de vie de l'isolant et la sécurité des équipements électriques. Il est donc essentiel de définir précisément les plages de température de fonctionnement des matériaux isolants pour assurer un fonctionnement sécurisé tout au long de leur durée de vie prévue.

Les classes thermiques des matériaux isolants sont rigoureusement définies selon les normes internationales telles que la CEI (Commission électrotechnique internationale) avec les normes CEI 85 et CEI 34-1 [41, 42]. Ces normes établissent une classification basée sur la température maximale à laquelle un matériau isolant peut être utilisé en continu pendant au moins 20 000 heures sans que ses propriétés diélectriques ne se dégradent au-delà d'un seuil critique, souvent fixé à environ 50 % de réduction de ses performances initiales [43, 44].

TABLE 1.2 – Classes thermiques des isolants [43, 44].

Classe thermique	Température limite (°C)	Exemples
Y	90	Coton, soie, papier, matières organiques similaires sans imprégnation ni immersion dans un diélectrique liquide
A	105	Mêmes matières que celles de la classe Y mais imprégnés ou immergés dans un diélectrique liquide
E	120	Emaux ou résines époxydes ou formol-polyvinyle
B	130	Matières minérales telles que le mica, fibre de verre
F	155	Mêmes matières que celles de la classe B mais avec des matières d'agglomération (résines alkyles, époxydes, polyesters)
H	180	Élastomères de silicones ou mica, fibre de verre, amiantes agglomérées avec résines de silicone
C	>180	Mica sans agglomérant, verre, quartz, porcelaine

## 1.4 Indicateurs de vieillissement des machines électriques

L'évaluation de l'état de l'isolation électrique est cruciale pour garantir la sécurité, la fiabilité et la longévité des machines électriques. En effet, l'isolation joue un rôle essentiel en séparant les conducteurs porteurs de courant et en protégeant les composants internes contre les décharges électriques.

Divers facteurs peuvent affecter l'isolation au fil du temps, tels que les contraintes thermiques, mécaniques et électriques. Il est donc important de surveiller et d'évaluer régulièrement l'état de l'isolation pour identifier et prévenir d'éventuels défaillances.

Plusieurs indicateurs permettent d'évaluer l'état de l'isolation des machines électriques. Ces indicateurs fournissent des informations précieuses sur les propriétés physiques et électriques de l'isolation, permettant ainsi de détecter des signes de dégradation et de prendre des mesures préventives en conséquence [45].

### 1.4.1 Tension d'apparition des DPs

Certains chercheurs se penchent sur la mesure de TADP comme indicateur de diagnostic durant le processus de vieillissement [46, 47, 48, 49]. Dans [47], le TADP d'une machine basse tension a été mesuré au début de sa vie, puis les stators ont été soumis à plusieurs cycles de vieillissement thermo-électrique. Une seconde mesure de TADP a ensuite été réalisée pour vérifier s'il était tombé en dessous d'un seuil critique. Bien que les données fournies par cette recherche ne soient pas nombreuses, certaines ont montré une diminution de TADP, tandis que pour quelques stators, il semblait augmenter. De manière similaire, dans [48], l'évolution de TADP a été étudiée au cours d'une expérience de vieillissement thermo-électrique. Cette étude visait également à évaluer l'impact de la fréquence de la tension sinusoïdale sur la durée de vie de l'isolation. Par ailleurs, la TADP a été mesurée à plusieurs reprises pendant la durée de vie des échantillons de paires torsadées soumis à un vieillissement accéléré à haute température dans [49]. Une diminution de TADP a été observée au fil du temps, caractérisée par une baisse initiale suivie d'une décroissance linéaire plus lente jusqu'à la rupture.

Par ailleurs, la figure 1.6 illustre le changement de TADP des échantillons de paires torsadées avec le vieillissement à haute température et la tension de l'onduleur. Cette étude s'inscrit dans une recherche plus vaste sur les tests multifactoriels et la prédiction de la durée de vie des systèmes d'isolation pour les machines électriques. Elle vise à établir un lien entre l'état ou la durée de vie restante du système d'isolation et la TADP pour les moteurs électriques alimentés par onduleur. Les résultats de cette recherche, basée sur des mesures répétées de TADP tout au long du vieillissement accéléré des échantillons de paires torsadées, ont été modélisés avec précision à l'aide du modèle de puissance inverse, offrant ainsi un indicateur fiable de l'évolution de l'isolation au fil du temps [49].

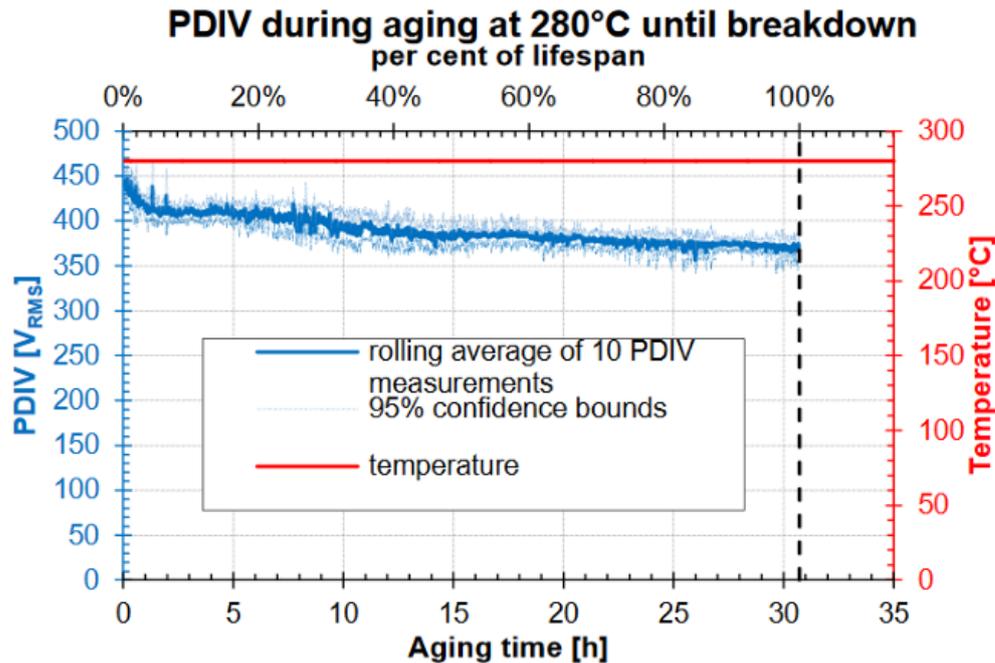


FIGURE 1.6 – Changement du PDIV des échantillons de paires torsadées avec le vieillissement à haute température et la tension de l'onduleur [49].

#### 1.4.2 Résistance d'isolation (RI)

La résistance d'isolation (RI) joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la santé des machines électriques. Conformément à la norme CEI 60034 [50], la RI mesure la capacité d'isolation entre les enroulements et le stator, permettant ainsi d'évaluer l'état de divers composants isolants tels que l'émail, le papier isolant et la résine.

Cette mesure peut être réalisée entre les phases ou entre les spires, fournissant des informations diagnostiques sur l'intégrité de l'isolation. Cependant, les mesures entre spires peuvent s'avérer difficiles, voire impossibles, car elles nécessitent souvent la déconnexion physique de parties de l'enroulement. C'est pourquoi la norme se concentre généralement sur la résistance entre le châssis et l'enroulement.

Dans le cas des machines électriques basse tension, la tension de test standard est généralement de 500 V, conformément à la norme [50]. La RI est ensuite calculée en utilisant la loi d'Ohm, en évaluant le rapport entre la tension appliquée et le courant traversant l'isolation une minute après l'application de la tension. De plus, la norme propose des coefficients correctifs pour les températures supérieures à 40 °C, car la mesure est fortement influencée par la température. Il est donc essentiel de prendre en compte l'état thermique de l'équipement testé lors de chaque mesure pour garantir la fiabilité des résultats, surtout lorsque la résistance d'isolation est utilisée comme indicateur de vieillissement.

### 1.4.3 Facteur de dissipation (D) ou $\tan\delta$

Le facteur de dissipation est complémentaire au facteur de puissance, constitue une mesure des pertes diélectriques dans l'isolation. Lorsque soumise à la tension alternative typiquement appliquée aux enroulements, l'isolation entre deux phases se comporte théoriquement comme un condensateur. Cependant, elle ne se comporte pas comme un condensateur idéal du fait que l'isolation s'échauffe légèrement et l'énergie n'est pas uniquement stockée, mais également dissipée. Ce phénomène est modélisé par une résistance en parallèle avec la capacité, comme illustré sur la figure 1.7. L'explication physique réside dans les molécules polaires de l'isolation qui oscillent à la fréquence de la tension alternative appliquée. Cette oscillation génère du frottement, produisant ainsi de la chaleur [34].

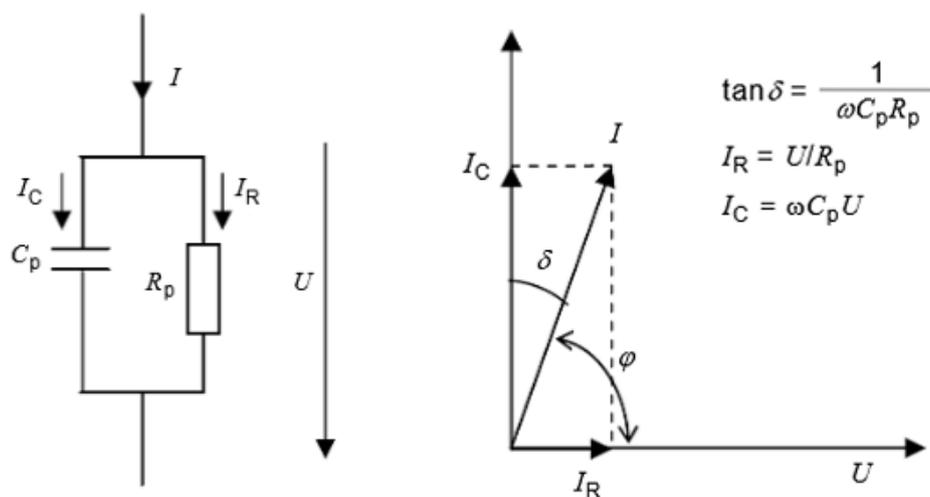


FIGURE 1.7 – Modèle d'isolation et diagramme de phase de courant tel que spécifié dans la norme [51].

La capacité  $C_p$  représente la capacité sans perte de l'isolation, tandis que la résistance  $R_p$  englobe tous les types de pertes diélectriques. Dans le diagramme de phase, le courant capacitif est en avance de 90 degrés par rapport au courant résistif. Le facteur de dissipation (D) correspond à la tangente de l'angle entre le vecteur du courant capacitif et la somme des vecteurs de courant résistif et capacitif. Cette valeur est exprimée sans unité ou, de manière un peu déroutante, sous forme de pourcentage. En réalité, il s'agit de la valeur de la tangente multipliée par cent.

La mesure du facteur de dissipation s'effectue à l'aide d'un instrument comprenant un pont de Shering. L'un des bras du pont est constitué d'une capacité et d'une résistance, tandis que l'autre est connecté à l'enroulement du moteur (comme illustré sur la figure 1.8, où  $R_x$  et  $C_x$  représentent les valeurs de capacité et de résistance de l'isolation). La résistance et la capacité sont équilibrées de manière à obtenir la même tension et le même angle de phase que ceux de l'enroulement du moteur [52]. La mesure du facteur de dissipation est sensible à l'humidité relative ambiante [53].

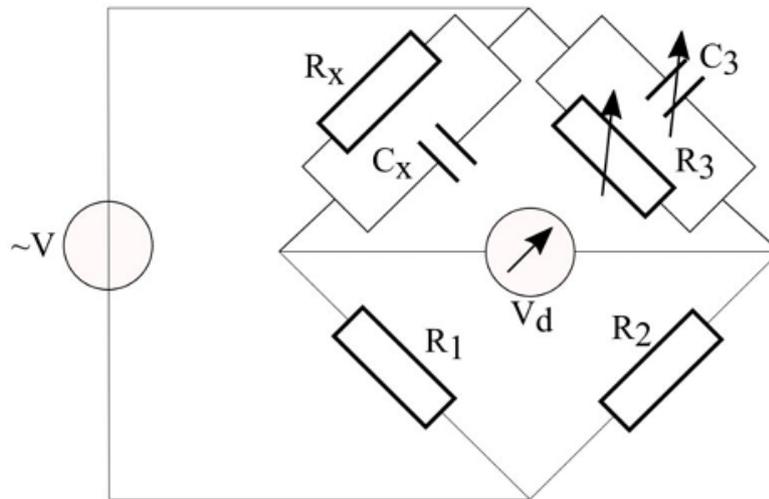


FIGURE 1.8 – Schéma du pont de Schering pour la mesure du facteur de dissipation.

#### 1.4.4 Capacité d'isolation

La mesure de la capacité d'isolation (CI) entre l'enroulement et la terre dans le stator d'une machine électrique est d'une importance capitale. Lors de la fabrication, on utilise fréquemment des tests de capacité pour vérifier si la résine a correctement pénétré les fentes de l'enroulement. Une valeur d'IC en dehors des normes peut témoigner d'un défaut d'imprégnation de l'enroulement.

Ces tests sont tout aussi pertinents pour les systèmes de refroidissement à eau. Une augmentation de la capacité peut indiquer une présence d'humidité dans l'isolation, tandis qu'une diminution peut découler de la dégradation thermique [52]. Cependant, il est crucial de souligner que CI ne subit aucune influence de l'humidité ambiante [53].

En règle générale, les variations de la capacité d'isolation sont très faibles, d'environ 0,1 % [52]. Par conséquent, des instruments de mesure plus précis que de simples capacimètres sont nécessaires pour obtenir des résultats significatifs. En outre, sa faible sensibilité aux changements et la possibilité d'effets contradictoires entre divers facteurs limitent son utilité pour suivre la dégradation ou la modélisation prédictive.

## 1.5 Prédiction du vieillissement et l'estimation de la durée de vie des machines électriques par l'IA

### 1.5.1 Introduction à l'intelligence artificielle et au deep learning

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine en plein essor qui vise à créer des systèmes capables de simuler l'intelligence humaine. Ces systèmes peuvent apprendre, raisonner, prendre des décisions et résoudre des problèmes de façon autonome, dépassant souvent les capacités humaines dans des domaines spécifiques. L'IA englobe un large éventail de techniques et d'approches, allant des systèmes basés sur des règles précises aux algorithmes complexes inspirés du fonctionnement du cerveau humain [54].

L'apprentissage profond (Deep Learning) est une sous-discipline de l'IA qui s'inspire des réseaux de neurones biologiques pour développer des modèles d'apprentissage automatique performants. Ces modèles sont constitués de plusieurs couches de neurones artificiels interconnectés. Ils ont la capacité de traiter et d'apprendre à partir de vastes quantités de données [55].

L'apprentissage profond a révolutionné de nombreux domaines, notamment la vision par ordinateur, le traitement automatique du langage et la reconnaissance vocale. Sa force réside dans sa capacité à apprendre à partir de données complexes et non structurées, ce qui le rend particulièrement adapté aux tâches où les approches traditionnelles d'apprentissage automatique atteignent leurs limites [55].

La recherche en apprentissage profond par renforcement a gagné en importance, où les politiques des agents sont apprises à travers des réseaux neuronaux profonds (Figure 1.9) [56, 57]. Selon les entrées et les sorties souhaitées pour la plupart des applications haute tension, quelques algorithmes d'apprentissage profond principalement supervisés ont été particulièrement intéressants dans ce domaine de recherche.

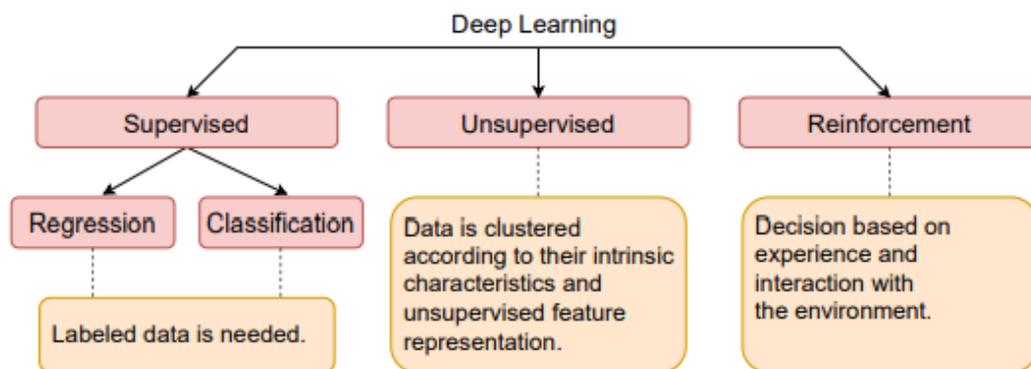


FIGURE 1.9 – Différentes branches de l'apprentissage profond : supervisé, non supervisé et par renforcement.

En effet, l'IA joue un rôle clé dans ce domaine, offrant des avantages significatifs aux entreprises. Voyons comment elle transforme la maintenance traditionnelle.

La maintenance prédictive consiste à anticiper les pannes d'équipements avant qu'elles ne surviennent, garantissant une fonctionnalité optimale et réduisant les

temps d'arrêt. L'IA révolutionne ce domaine en exploitant des technologies telles que l'analyse avancée des données, la reconnaissance de motifs et la modélisation prédictive. Voici comment l'IA améliore chaque aspect de la maintenance prédictive [58] :

- **Analyse avancée des données** : Les systèmes d'IA examinent les informations générées par les opérations industrielles, détectant des schémas et des corrélations que les analystes humains pourraient ne pas remarquer. Cela permet d'améliorer l'efficacité opérationnelle et d'évaluer l'état des équipements.
- **Modélisation prédictive** : Grâce à l'apprentissage automatique, des modèles prédictifs sont élaborés à partir de données historiques. Ils anticipent les pannes probables et recommandent le moment optimal pour la maintenance.
- **Détection des anomalies** : L'IA surveille en temps réel les machines, identifiant tout écart par rapport aux paramètres de fonctionnement standard. Elle permet de réagir rapidement pour éviter que de petits problèmes ne deviennent majeurs.

En réduisant les temps d'arrêt imprévus et en optimisant les opérations de maintenance, l'IA offre un avantage concurrentiel significatif aux entreprises. Elle permet une gestion proactive des équipements, améliorant la fiabilité, la disponibilité et la durée de vie des actifs industriels [59].

### 1.5.2 Modèles d'intelligence artificielle pour la prédiction du vieillissement

Les réseaux de neurones artificiels (RNAs) sont la méthode la plus répandue en intelligence artificielle. Les RNAs établissent une relation fonctionnelle entre les entrées et les sorties souhaitées, nécessitant l'ajustement des paramètres pour obtenir des performances optimales. La figure 1.10 illustre un réseau de neurones récurrents (RNAs) avec une seule couche cachée, où seules les couches cachée et de sortie comportent des neurones, agissant comme des unités de traitement pour les entrées. Les poids synaptiques sont assignés des entrées vers la couche cachée et de celle-ci vers la couche de sortie. Dans les réseaux récurrents, des connexions de rétroaction peuvent relier la couche de sortie à la couche cachée, voire à la même couche. Ces connexions de rétroaction permettent aux RNAs de maintenir une mémoire des informations passées, ce qui est particulièrement utile pour les tâches séquentielles et temporelles.

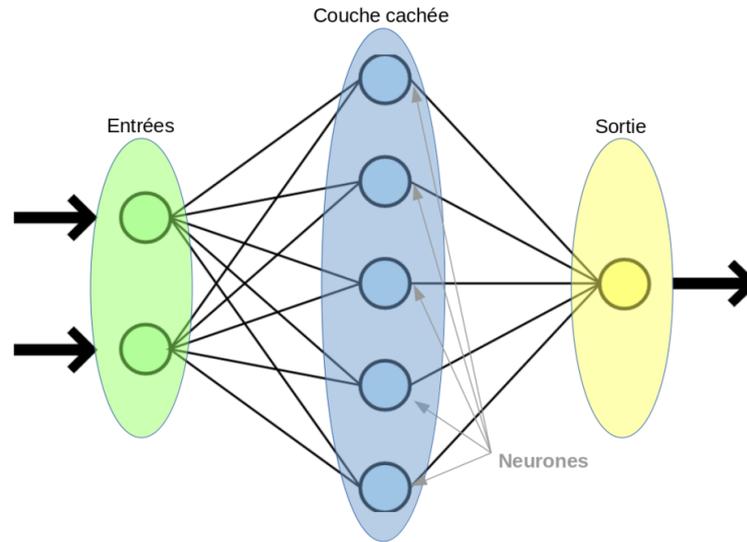


FIGURE 1.10 – Un perceptron multicouche avec une seule couche cachée est un type de réseau de neurones artificiels [60].

Les RNAs sont largement utilisés dans le domaine de la prédiction de défaillance. Par exemple, ils ont été employés pour réduire le temps de calcul requis pour résoudre des équations différentielles non linéaires et pour prédire les modèles de fatigue et d'autres types de défaillance concernant la durée de vie résiduelle des structures [61]. Récemment [62], des recherches se sont concentrées sur l'utilisation des RNAs pour prédire divers paramètres diagnostiques non linéaires des systèmes d'isolations, comme le facteur de dissipation ( $\tan\delta$ ), la résistance d'isolation (RI), la capacité d'isolation (CI), ainsi que des propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, l'allongement et la tension de claquage.

La méthode de Prédiction basée sur la Progression du Reste de Vie combine un modèle de réseau de neurones avec des techniques linéaires et non linéaires. Son objectif principal est d'évaluer les bornes supérieures et inférieures du reste de vie des enroulements [63]. En utilisant cette approche, les ingénieurs peuvent obtenir une estimation plus précise du reste de vie des enroulements, ce qui est crucial pour la maintenance prédictive et la planification des activités de maintenance.

L'architecture du Réseau Neuronal Dynamique à Ondelettes est spécifiquement conçue pour transformer les données des capteurs en l'évolution temporelle d'un motif de défaillance, afin de prédire la durée de vie restante des enroulements [64]. En utilisant des techniques d'ondelettes, ce modèle permet une analyse plus approfondie des signaux électriques et offre ainsi des prédictions plus précises du reste de vie des enroulements, ce qui est essentiel pour une maintenance proactive et efficace.

Ces classes de réseaux neuronaux ont été développées pour prédire le reste de vie des enroulements individuels et des enroulements groupés [65]. Chaque classe utilise trois techniques différentes de calcul des poids pour effectuer la prédiction, offrant ainsi aux ingénieurs une gamme d'approches pour évaluer la santé des enroulements et planifier les activités de maintenance en conséquence.

Cette approche combine une carte auto-organisatrice avec un réseau de neurones artificiels (RNAs) pour prédire la défaillance des enroulements [66]. Bien que cette méthode ait montré des résultats prometteurs dans la prédiction des défaillances, elle souligne également les défis liés à la modélisation du processus de prédiction sur toute la durée de vie des enroulements en raison de la forte dispersion des durées de vie des enroulements. Cela met en évidence l'importance de développer des modèles robustes qui peuvent tenir compte de la variabilité inhérente des données de défaillance des enroulements.

L'utilisation de réseaux de neurones convolutifs (CNN) pour la prédiction du TADP constitue une avancée significative dans le domaine de l'intelligence artificielle appliquée aux systèmes d'isolation électrique. Les CNN sont des modèles d'apprentissage en profondeur largement utilisés dans le traitement d'images et d'autres types de données séquentielles. Leur capacité à extraire automatiquement des caractéristiques pertinentes à partir de données brutes les rend des outils puissants pour la prédiction et la classification. Ces réseaux sont particulièrement adaptés pour analyser les données provenant de capteurs de surveillance des systèmes d'isolation, car ils peuvent identifier des schémas complexes et des tendances subtiles qui peuvent indiquer des changements dans l'état de l'isolation électrique.

Dans le contexte spécifique de la prédiction du TADP, les CNN sont entraînés sur un ensemble de données comprenant des paramètres d'entrée tels que le diamètre, l'épaisseur de l'isolation, la permittivité relative et la température. Ces paramètres sont ensuite utilisés pour prédire le TADP, qui est une mesure critique de la santé de l'isolation électrique. Grâce à leur capacité à apprendre des relations complexes entre les données d'entrée et les sorties correspondantes, les CNN peuvent fournir des prédictions précises du TADP, aidant ainsi à évaluer et à surveiller l'état de l'isolation électrique des machines [67].

L'intégration de CNN dans la prédiction du TADP offre plusieurs avantages, notamment une meilleure précision par rapport aux méthodes traditionnelles, une capacité à gérer des données complexes et non structurées, et une adaptabilité à différentes conditions de fonctionnement. De plus, l'utilisation d'hyperparamètres optimisés et de techniques d'optimisation avancées telles que l'optimisation bayésienne contribue à améliorer les performances des modèles CNN pour la prédiction du TADP [68].

## 1.6 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a exploré divers aspects du vieillissement des systèmes d'isolation dans les machines électriques, ainsi que l'application de l'intelligence artificielle (IA) pour prédire ce vieillissement et estimer la durée de vie restante. Nous avons examiné les types de vieillissement sous contrainte, les différents systèmes d'isolation utilisés dans les machines électriques et les indicateurs de vieillissement couramment utilisés. De plus, nous avons évoqué de l'utilisation de techniques intelligentes telles que les réseaux de neurones artificiels et les réseaux de neurones convolutifs dans l'amélioration de la prédiction du vieillissement et la gestion de la maintenance prédictive. Bien que des progrès significatifs aient été réalisés dans ce domaine, des défis subsistent, notamment en ce qui concerne la

---

disponibilité des données et la précision des modèles prédictifs. Cependant, en poursuivant la recherche et le développement dans ce domaine, nous pouvons espérer des avancées continues qui contribueront à améliorer la fiabilité et l'efficacité des machines électriques dans divers secteurs industriels.

## **Chapitre 2**

# **Méthodologies de Mesure et Campagnes de Vieillessement**

## 2.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à l'étude de l'impact du vieillissement électrique sur des éprouvettes torsadées des fils émaillés, en procédant à l'analyse des échantillons un par un pour identifier les variations des paramètres électriques. Nous décrivons en détail les méthodologies et les appareils utilisés pour mesurer les indicateurs de vieillissement des systèmes d'isolation électrique, ainsi que la campagne expérimentale de vieillissement menée sur les matériaux étudiés. Cette étude commencera par une présentation des fils émaillés à base de polyesterimide (PEI) et de polyamide-imide (PAI), en mettant en avant leurs propriétés spécifiques, suivie par la préparation des éprouvettes torsadées selon les normes établies.

Ensuite, nous aborderons les dispositifs d'analyse des indicateurs de vieillissement, notamment la mesure de la Tension d'Apparition des Décharges Partielles (TADP) et les tests de vieillissement accéléré. Nous détaillerons le fonctionnement des appareils de vieillissement, incluant la mesure de la tension de claquage. Nous présenterons, à la fin, la méthodologie d'analyse microscopique suivie de la mesure de l'épaisseur de l'isolant des échantillons avant et après vieillissement. Ceci permettra de visualiser les dégradations physiques subies par les matériaux et d'évaluer leur impact sur les propriétés de l'isolant.

## 2.2 Matériaux du système étudié et propriétés

Les tests réalisés au LSEE (Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement) "relevant de l'université d'Artois de Béthune" portent sur deux fils émaillés classiques à base de polyesterimide (PEI) et de polyamide-imide (PAI). Le premier possède un diamètre de 1,25 mm et le second un diamètre de 0,5 mm. Les deux fils émaillés utilisés dans nos études sont de grade 2 et de classe thermique 210 °C (Tableau 1.2 du chapitre 1), conformément aux spécifications de la norme CEI 60317-13 :2010 [69].

## 2.3 Préparation des éprouvettes torsadées

Ces éprouvettes torsadées, qui seront illustrées sur les (Figures 2.2 et 2.3 respectivement), sont produites à l'aide d'un dispositif normalisé TURNS de la marque RIGON, comme montré sur la figure 2.4. Ce dispositif est spécialement conçu pour tordre l'éprouvette en appliquant une force de traction standardisée de 27 N et en effectuant exactement 6 tours pour un diamètre de 1,25 mm et une force de 7 N et en effectuant 12 tours pour un diamètre de 0,5 mm (Tableau 2.1).

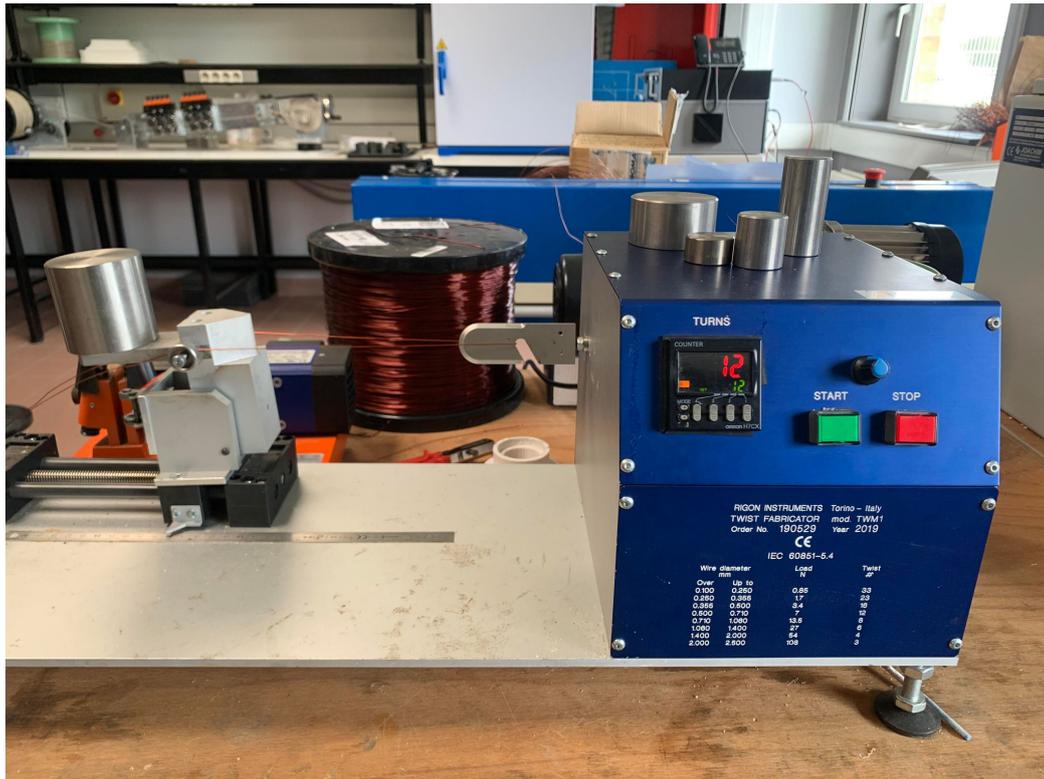


FIGURE 2.1 – Machine "TURNS" pour réaliser les éprouvettes torsadées

TABLE 2.1 – Force et nombre des tours pour la confection des éprouvettes torsadées [70]

Diamètre nominal (mm)		Force totale appliquée sur les deux fils (N)	Nombre de tours par 125 mm
De	Jusqu'à et compris		
0,1	0,25	0,85	23
0,25	0,35	1,7	23
0,35	0,5	3,4	16
0,5	0,75	7	12
0,75	1,05	13,5	8
1,05	1,55	27	6
1,55	2,15	54	3
2,15	3,5	108	3

Conformément à la norme CEI 60851-5.4 [71], la longueur utile de la torsade est fixée à 200 mm pour les deux fils de diamètres différents 1,25 mm et 0,5 mm (Figure 2.2 et Figure 2.3). Avant le processus de torsion, le cuivre est dénudé sur une longueur d'environ 2 cm à l'aide d'un outil électrique spécial appelé "Abisofix", présenté sur la figure 2.4.

Cette étape est essentielle pour éviter toute contrainte mécanique sur la partie active de l'éprouvette et garantir des conditions de test uniformes et fiables.

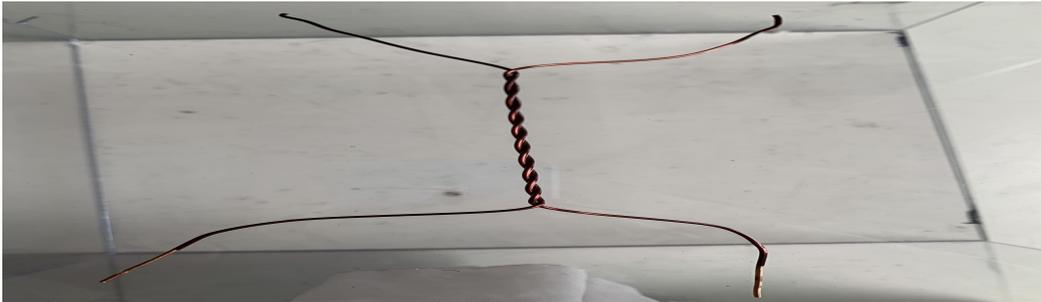


FIGURE 2.2 – Éprouvette torsadée de 1,25 mm de diamètre



FIGURE 2.3 – Éprouvette torsadée de 0,5 mm de diamètre



FIGURE 2.4 – Machine à dénuder "Abisofix"

## 2.4 Dispositifs d'analyse des indicateurs de vieillissement

### 2.4.1 Mesures de Capacité ( $C_p$ ), impédance ( $Z$ ), résistance ( $R_p$ ) et facteur de dissipation ( $D$ )

Nous avons utilisé un analyseur d'impédance de marque KEYSIGHT. Il s'agit d'un pont RLC de marque Agilent 4980A, disponible dans le laboratoire LSEE. Ce dispositif a été employé pour mesurer les quatre indicateurs sur une plage de fréquences allant de 20 Hz à 2 MHz, avec une faible tension comprise entre 1 Veff et 2 Veff. Cet analyseur est conçu pour offrir des mesures à des tensions plus basses et pour éviter les effets non linéaires qui peuvent apparaître à des tensions plus élevées. Une illustration des trois photos dans la figure 2.5 montre les indicateurs à mesurer. Ces photos affichent les valeurs des indicateurs pour une fréquence donnée.

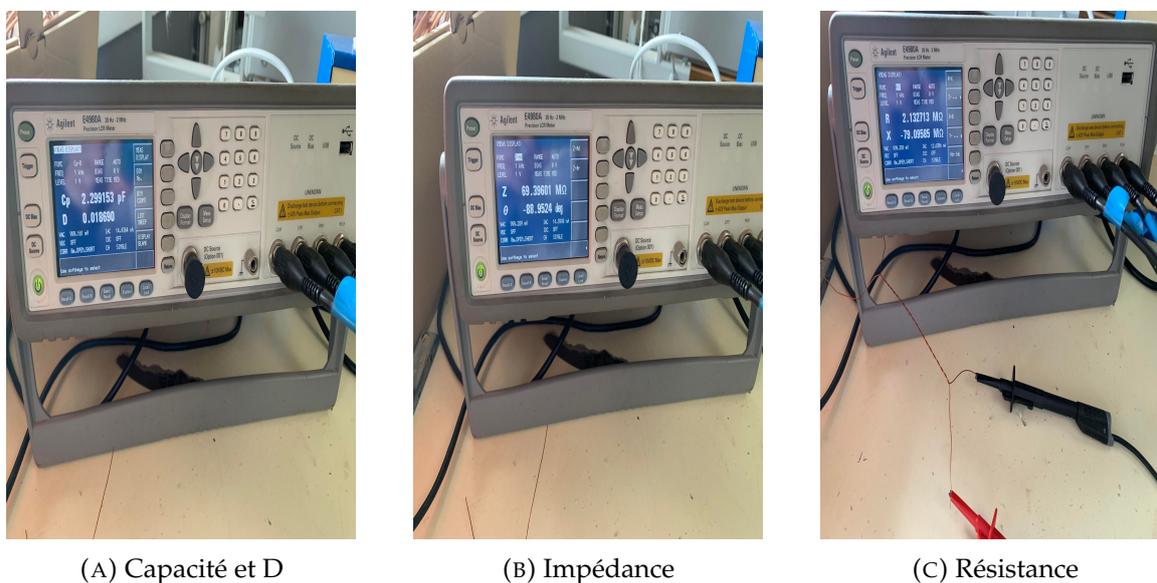
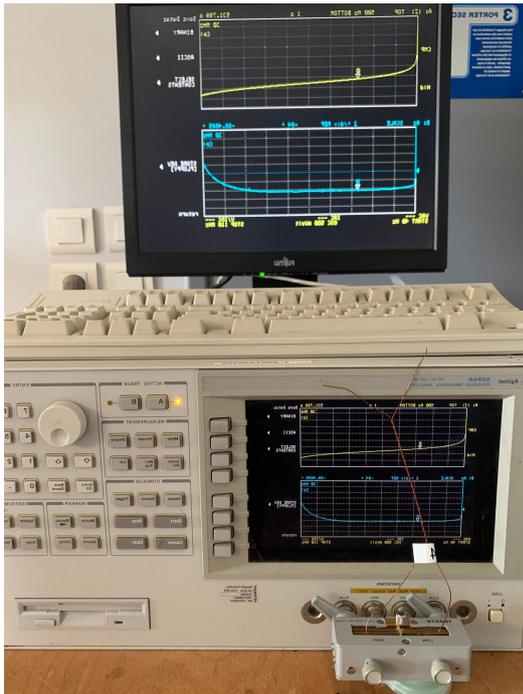
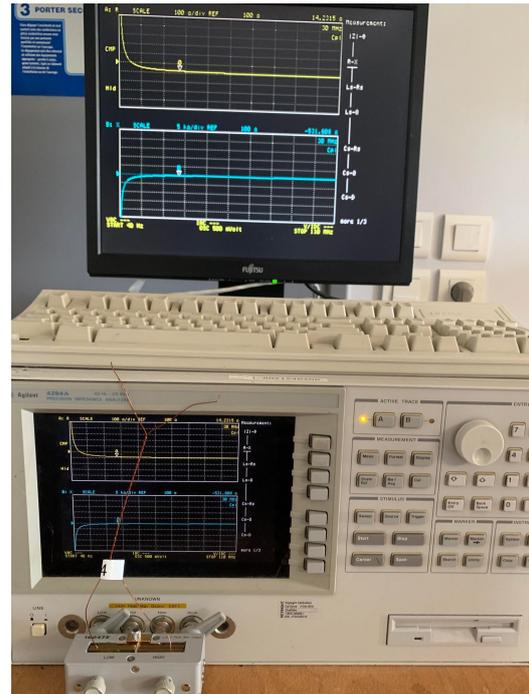


FIGURE 2.5 – Analyseur d'impédance Agilent 4980A

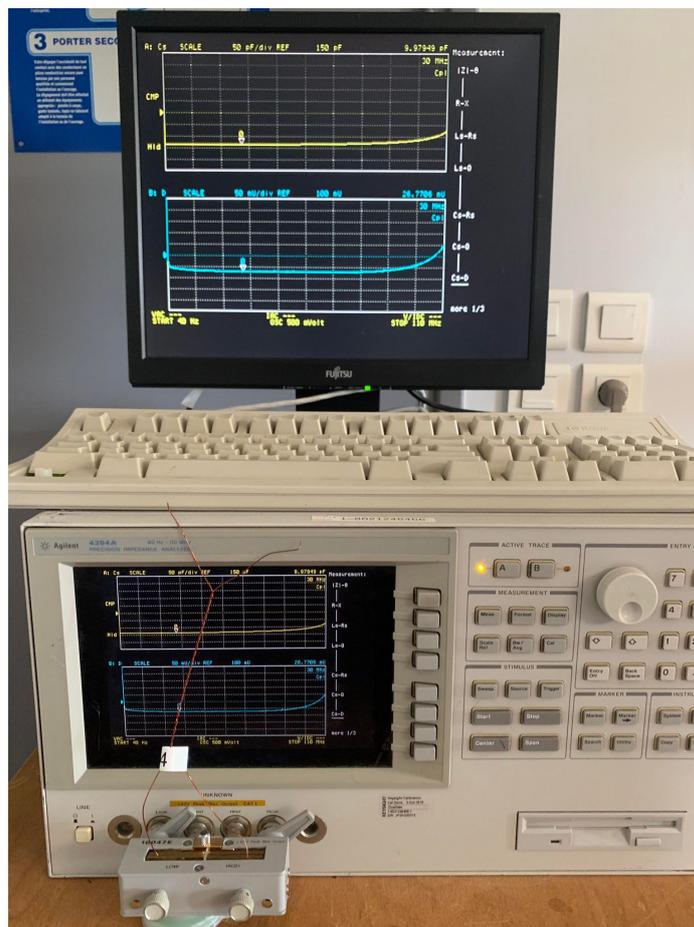
En complément, un deuxième analyseur d'impédance de type Agilent 4294A, également de marque KEYSIGHT (Figure 2.9), a été utilisé pour réaliser des mesures de la capacité d'échantillons ainsi que de leur facteur de pertes diélectriques. Les mesures ont été réalisées avec une faible tension, variant de 1 V à 2 Vppmax, et sur une gamme de fréquences allant de 40 Hz à 110 MHz. Le fonctionnement de cet analyseur repose sur l'utilisation d'un pont auto-équilibré et d'une mesure à 4 points, permettant de déterminer les valeurs de l'impédance, de la capacité, de la résistance de l'isolation et du facteur de dissipation. Il offre également la possibilité de visualiser graphiquement les indicateurs mesurés.



(A) Mesure de l'impédance



(B) Mesure de la résistance



(C) Mesure de la capacité et facteur de dissipation

FIGURE 2.6 – Analyseur d'impédance Agilent 4294A : (a) Impédance, (b) Résistance, et (c) Capacité et  $\tan \delta$

## 2.5 Mesure de la tension d'apparition des décharges partielles (TADP)

La détermination de la tension à laquelle les décharges partielles se produisent est réalisée au moyen de notre dispositif expérimental, comme illustré sur les figures 2.7 et 2.8. La figure 2.7 montre le montage général du dispositif, tandis que la figure 2.8 démontre spécifiquement comment l'éprouvette testée est placée dans la cage de Faraday pour les mesures de décharges partielles, ainsi que son schéma électrique correspondant sur la figure 2.9. Ce dispositif comprend une cage de Faraday dans laquelle sont installés deux auto-transformateurs, un transformateur BT/HT, un shunt et un amplificateur.

Initialement, un autotransformateur ajuste la tension d'entrée à 230 V/50 Hz pour assurer une alimentation stable. Cette tension est ensuite précisément adaptée et contrôlée par un autre autotransformateur afin de garantir des conditions de tension constantes et exemptes de fluctuations indésirables.

Le dispositif est également équipé d'un transformateur BT/HT, essentiel pour modifier les niveaux de tension nécessaires aux mesures. Un shunt en série avec une capacité de couplage est intégré pour mesurer précisément les courants et les tensions en jeu.

Enfin, un amplificateur est connecté à l'appareil de mesure pour amplifier les signaux électriques. Cela permet une détection des décharges partielles.



FIGURE 2.7 – Mesureur de la TADP



FIGURE 2.8 – Epreuve testée

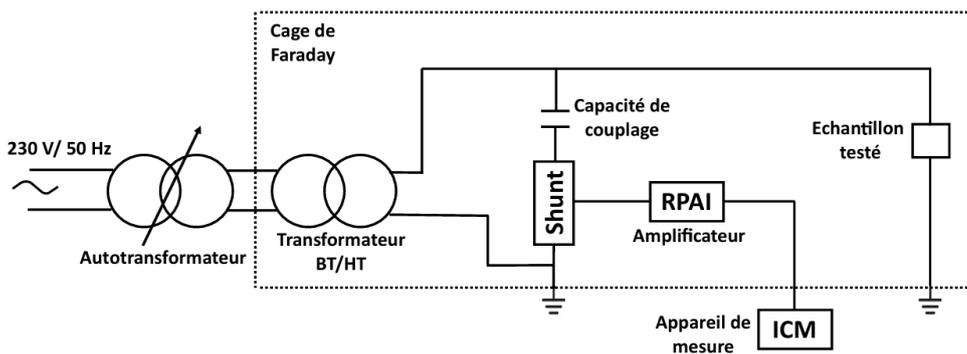


FIGURE 2.9 – Schéma électrique du mesureur de la TADP

## 2.6 Description des tests de vieillissement

L'appareil de vieillissement électrique utilisé dans cette étude est spécifiquement conçu pour appliquer une tension contrainte aux échantillons d'isolation électrique, simulant ainsi les conditions de vieillissement. Limitée à une fréquence de 1 kHz, la tension appliquée est contrôlée pour être égale à deux fois la valeur de la TADP (Tension d'Apparition de Décharges Partielles) sur un fil de 1,25 mm de diamètre et à 2,5 fois la valeur de la TADP sur un fil de 0,5 mm de diamètre, afin d'accélérer le vieillissement électrique des éprouvettes. Ce dispositif garantit une manipulation sécurisée des échantillons tout en fournissant des mesures de la durée de vie après claquage.

Les composants de l'appareil comprennent un générateur de basse fréquence (GBF) pour fixer la tension de claquage, deux amplificateurs pour amplifier les tensions en fonction de la fréquence, un Raspberry Pi pour la gestion des données, les alertes en cas de court-circuit, et un écran d'affichage pour la visualisation des

données en temps réel. Les échantillons sont placés dans une armoire métallique fermée pour assurer leur sécurité et pour diminuer le niveau de bruit électromagnétique.



FIGURE 2.10 – Appareil de vieillissement électrique

## 2.7 Mesure de la tension de claquage

La mesure de la tension de claquage se fait à l'aide d'un appareil appelé "Break down tester" (Figure 2.14). Cet appareil est utilisé pour mesurer la tension de claquage des matériaux isolants. Pour utiliser cet appareil, l'éprouvette (un fil de 1,25 mm de diamètre) est placée dans le support de test (les billes), en s'assurant qu'elle est correctement positionnée. Ensuite, la tension de départ est réglée et augmentée progressivement jusqu'à atteindre la tension de claquage. La tension appliquée est surveillée à l'aide de l'affichage numérique de l'appareil, et la valeur de la tension de claquage est notée lorsque le claquage se produit, généralement en quelques secondes.



FIGURE 2.11 – Appareil "break down tester" de mesure de la tension de claquage

## 2.8 Analyse microscopique

Le microscope Axiocam ERC 5s (Figure 2.12) représente une technologie de pointe équipée d'un capteur CMOS de 5 mégapixels, assurant une résolution maximale de 2560 x 1920 pixels. Compatible avec divers microscopes optiques, il est doté d'une interface USB 3.0 permettant un transfert rapide des données. Livré avec le logiciel ZEN (Zeiss Efficient Navigation), il facilite l'acquisition, l'analyse et la documentation complètes des images à haute résolution des échantillons. L'examen de l'état de l'isolant avant et après les tests se fait en positionnant les éprouvettes sous les objectifs du microscope. L'épaisseur de l'isolant est mesurée à différents points des éprouvettes grâce au logiciel d'analyse d'images intégré à la caméra, tout en identifiant les zones de dégradation et d'érosion causées par le claquage.

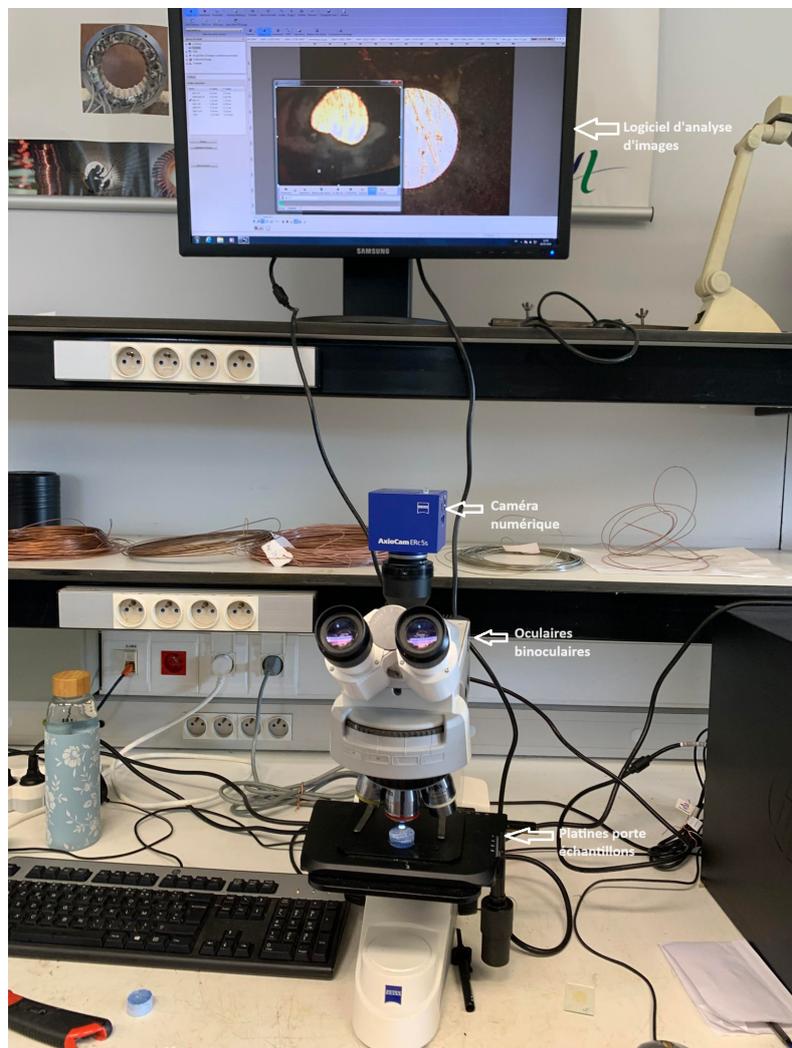


FIGURE 2.12 – Microscope Axiocam ERC 5s

## 2.9 Conclusion

Ce chapitre a décrit en détail les procédures expérimentales et les équipements utilisés pour l'étude des fils émaillés sous différents paramètres de vieillissement. Les éprouvettes torsadées ont été préparées selon des normes spécifiques. Les dispositifs d'analyse tels que les analyseurs d'impédance Agilent 4980A et 4294A ont permis de mesurer les paramètres électriques tels que la capacité, l'impédance, la résistance et le facteur de dissipation (D). De plus, le système de mesure de la tension de claquage a été utilisé pour évaluer la performance diélectrique des échantillons. En positionnant les éprouvettes sous les objectifs du microscope, j'ai pu examiner minutieusement l'état de l'isolant avant et après les tests. Grâce Finalement, l'analyse microscopique a pour but d'identifier au niveau de l'isolant les zones ayant subi des dégradations et d'érosions suite au claquage.

Dans le chapitre suivant, nous analyserons et interpréterons les résultats obtenus à l'aide de ces méthodologies et équipements, afin de tirer des conclusions sur les performances des matériaux étudiés face au vieillissement électrique.

## **Chapitre 3**

# **Analyse des données et interprétation des résultats**

### 3.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur une analyse approfondie des corrélations entre les différents indicateurs de vieillissement et la durée de vie des fils émaillés. Les indicateurs étudiés incluent TADP, la capacité, la tension de claquage. L'objectif est de comprendre comment ces facteurs influencent la stabilité des isolants électriques et leur capacité à maintenir des performances optimales tout au long de leur durée de vie.

L'analyse des corrélations a été utilisée pour évaluer les relations entre ces paramètres et la durée de vie des échantillons testés. Cette approche permet de déterminer quelles mesures peuvent servir d'indicateurs prédictifs fiables pour estimer la durabilité des fils émaillés dans des conditions réelles d'utilisation électrique.

### 3.2 Résultats des mesures initiales avant vieillissement

Dans le tableau 3.1, nous présentons les différents indicateurs mesurés à l'état initial, un avec un diamètre de 1,25 mm et de 0,5 mm. Ces tests ont été réalisés sur 30 éprouvettes pour chaque diamètre. Les mesures initiales comprennent des paramètres clés tels que la capacité, la résistance, l'impédance et facteur de dissipation (D), qui sont essentiels pour évaluer les propriétés électriques des fils émaillés.

En fait pour chaque diamètre, une éprouvette saine (donc avant tout vieillissement) a été sélectionnée de manière aléatoire et soumise à des tests en vue de suivre, dans une large gamme de fréquence, les variations des différents paramètres la caractérisent et qui sont l'impédance, la résistance, le facteur de dissipation et la capacité. A mesure que la fréquence augmente, nous observons une diminution de l'impédance, de la résistance et du facteur de dissipation diélectrique des fils émaillés de même diamètre, tandis que leur capacité reste relativement invariante. En augmentant le diamètre, contrairement à la capacité qui montre, en général, une légère augmentation, nous avons remarqué une légère augmentation de l'impédance, de la résistance et du facteur de dissipation diélectrique.

TABLE 3.1 – Valeurs d'indicateurs pour l'analyseur Agilent 4980A

Diamètre	Fréquence (kHz)	$20 \times 10^{-3}$	1	10	50	1000	2000
1,25 mm	Z (k $\Omega$ )	$2,84 \times 10^5$	$1,45 \times 10^4$	$1,06 \times 10^3$	$2,13 \times 10^2$	$1,07 \times 10^1$	5,28
	$\theta$ (°)	118,2	89,78	89,6	89,45	89,38	89,35
	C (pF)	13,69	15,02	15,25	15,19	14,77	14,78
	D	$3,84 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$4,91 \times 10^{-3}$	$6,29 \times 10^{-3}$	$1,29 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$
	R ( $\Omega$ )	$9,93 \times 10^7$	$5,2 \times 10^4$	$6,13 \times 10^3$	$1,88 \times 10^3$	$1,24 \times 10^2$	$6,11 \times 10^1$
0,5 mm	Z (k $\Omega$ )	$2,57 \times 10^5$	$1,72 \times 10^4$	$1,29 \times 10^3$	$2,61 \times 10^2$	$1,34 \times 10^1$	6,79
	$\theta$ (°)	119,32	89,87	89,5	89,47	89,51	89,68
	C (pF)	29,6	12,56	12,22	12,1	11,8	11,7
	D	$1,02 \times 10^{-1}$	$3,8 \times 10^{-3}$	$7,437 \times 10^{-3}$	$9,27 \times 10^{-3}$	$8,57 \times 10^{-3}$	$5,58 \times 10^{-3}$
	R ( $\Omega$ )	$7,1 - 5 \times 10^8$	$3,2 \times 10^4$	$9,5 \times 10^3$	$2,41 \times 10^3$	$1,14 \times 10^2$	$3,78 \times 10^1$

Ensuite, nous examinons les caractéristiques électriques des divers échantillons, mettant en évidence la capacité, l'impédance et le facteur de dissipation (D). Ces données sont obtenues à l'aide de l'analyseur Agilent 4294A.

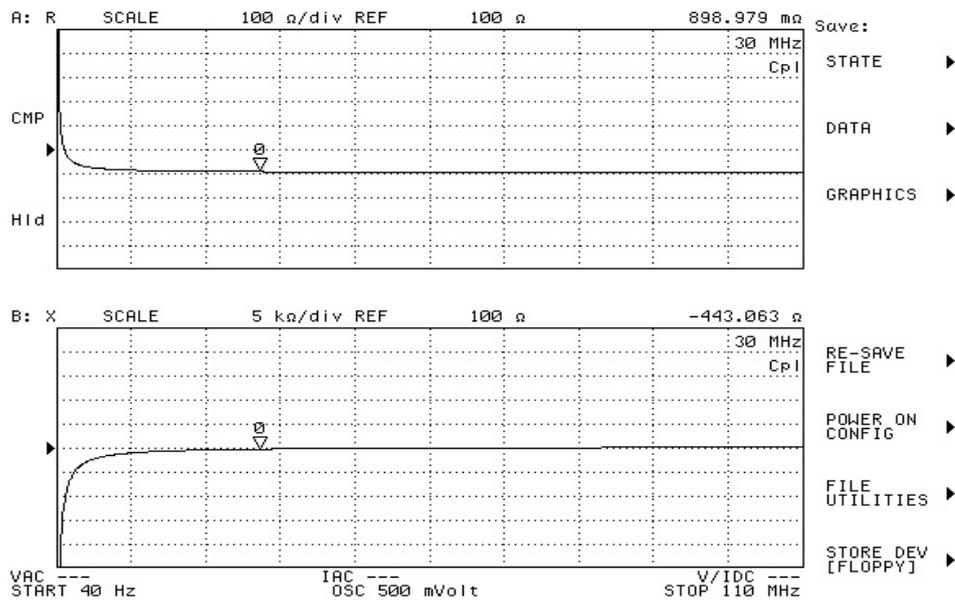


FIGURE 3.1 – Courbes de l'impédance mesurée avec l'analyseur Agilent 4294 sur une large gamme de fréquences allant de 40 Hz à 110 MHz

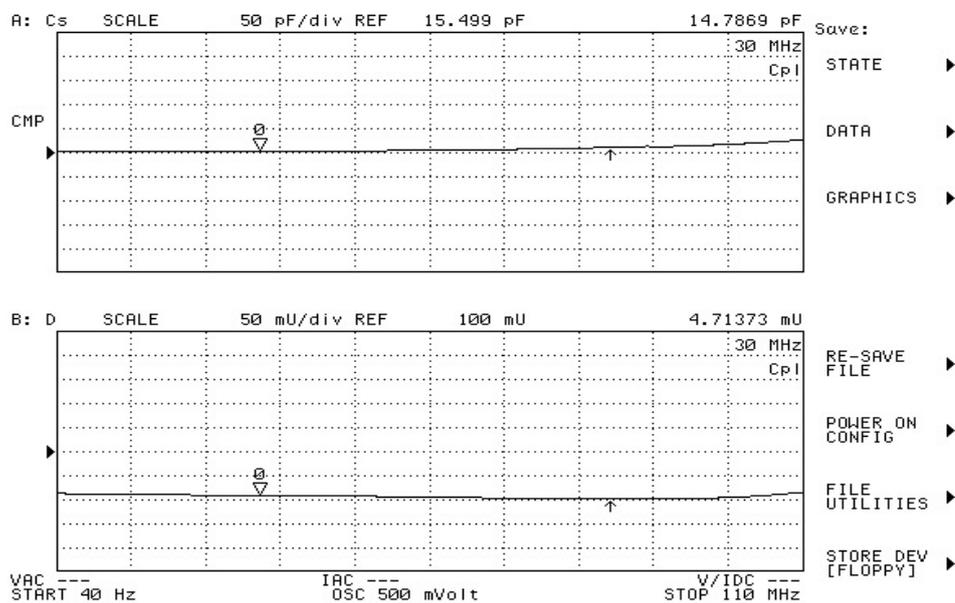


FIGURE 3.2 – Courbes de la capacité et D mesurées avec l'analyseur Agilent 4294 sur une large gamme de fréquences allant de 40 Hz à 110 MHz

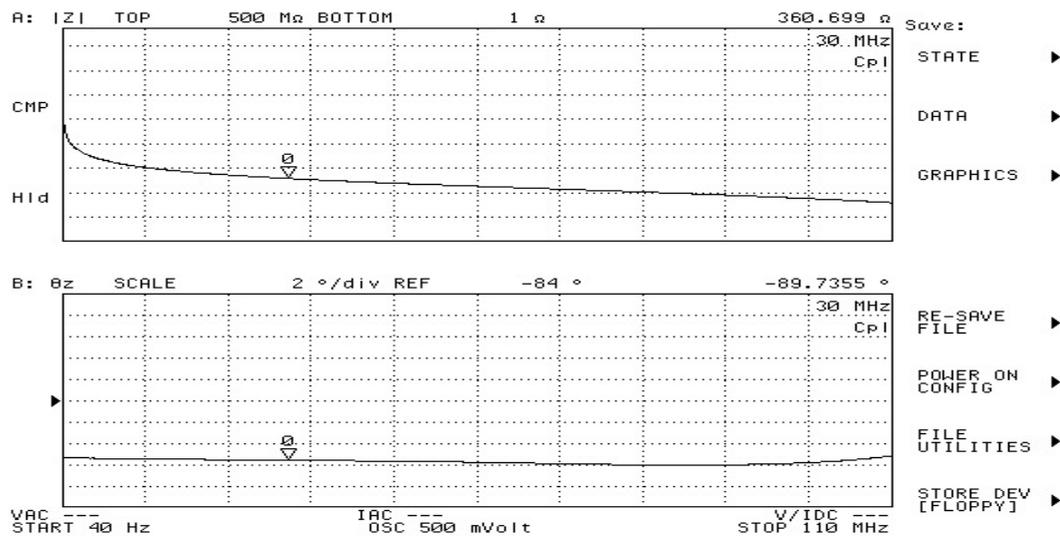


FIGURE 3.3 – Courbes de l'impédance mesurée avec l'analyseur Agilent 4294 sur une large gamme de fréquences allant de 40 Hz à 110 MHz

### 3.3 Mécanismes des Décharges Partielles et Résultats des Essais de la TADP pour Fils Émaillés

Les décharges partielles (DPs) peuvent se produire principalement à l'extérieur des couches isolantes de haute qualité, souvent dans des vacuoles résiduelles présentes dans le système d'isolation électrique (SIE) des fils émaillés. Selon Hayashi [72], les DP sont observées principalement entre les fils émaillés, comme illustré dans la Figure 3.4. Cette figure montre le champ électrique entre les fils avant et après la première décharge lors des alternances de tension. Les figures sont représentatives des phénomènes observés, bien que leurs échelles soient adaptées pour faciliter la lecture.

Le champ électrique entre les conducteurs est proportionnel à la différence de potentiel appliquée et dépend des propriétés diélectriques des matériaux utilisés. Il se divise en deux composantes distinctes :  $E_1$  à travers l'isolant avec une permittivité relative 1, et  $E_0$  à travers l'air entre les fils émaillés avec une permittivité 0. Comme indiqué par Kwan [73], une augmentation de la tension appliquée sur l'éprouvette entraîne une augmentation du champ électrique entre les fils ( $E_0$ ), tel que représenté sur la Figure 3.4.

Lorsque le champ appliqué dépasse une valeur critique appelée champ seuil de décharge (EDP), déterminé par la courbe de Paschen, une décharge partielle peut se produire [72]. Cette décharge crée une accumulation de charges électriques sur les surfaces isolantes, induisant un champ électrique interne opposé au champ appliqué ( $E_{ch}$ ), comme illustré sur la Figure 1.4(b). Pendant l'ionisation de l'air, les charges s'accumulent sur les surfaces isolantes, modifiant le champ résultant ( $E_{ar}$ ) et augmentant le champ électrique interne ( $E_{ch}$ ) [74].

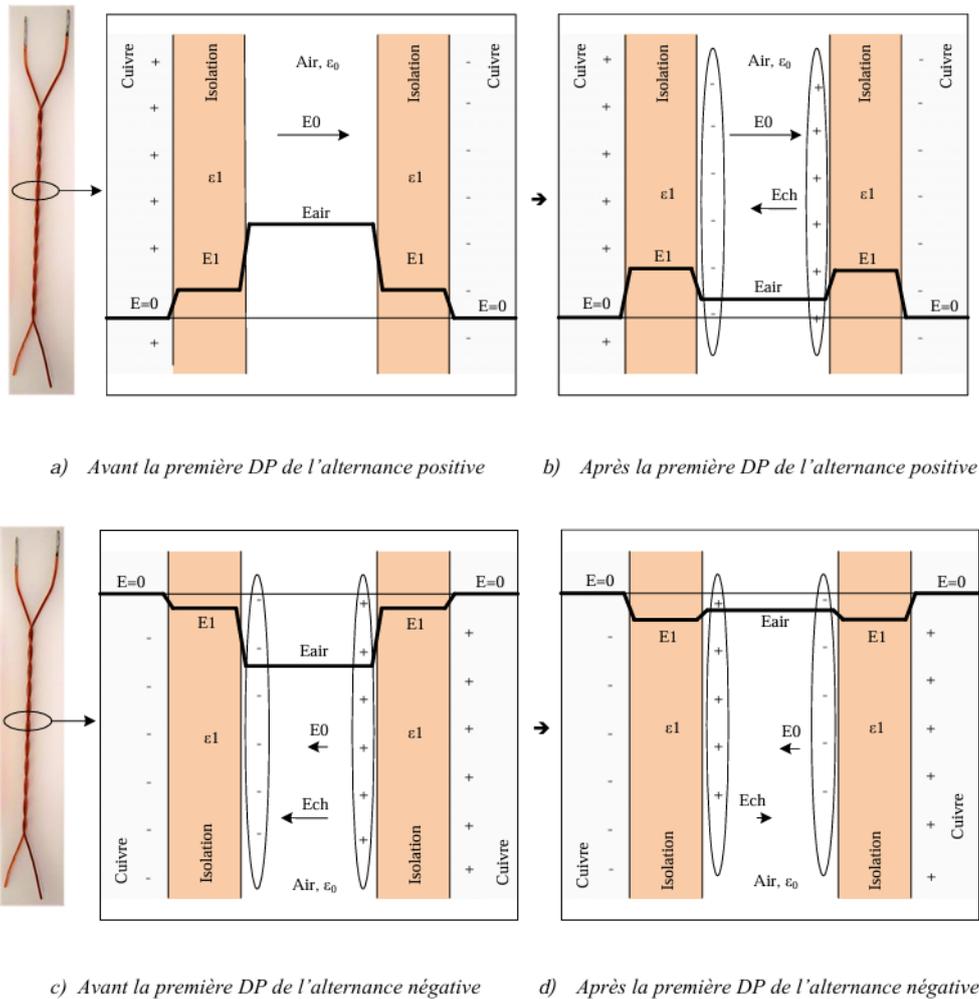


FIGURE 3.4 – Comportement du champ électrique entre les fils d'une éprouvette avant et après la première DP de l'alternance positive et négative. Vue au niveau de la section d'une éprouvette torsadée [75]

Pour quantifier ces effets, les tests ont été réalisés sur un total de 30 éprouvettes de deux diamètres différents : 1,25 mm et 0,5 mm, utilisant une cage de Faraday pour assurer des conditions de mesure contrôlées. Chaque diamètre a fait l'objet de 12 essais, conformément aux directives rigoureuses de la norme CEI 61934 [76]. Cette norme exige des mesures répétées de la Tension d'Amorçage des Décharges Partielles (TADP) afin d'obtenir une moyenne robuste, réduisant ainsi les variations et permettant une évaluation précise des propriétés diélectriques des matériaux testés. Les résultats de ces essais sont présentés de manière détaillée dans les tableaux 3.2 et 3.3, fournissant une base fiable pour comprendre et comparer les performances des fils émaillés dans des conditions de décharges partielles sous tension alternative.

Ces deux tableaux indiquent que, pour une même éprouvette, la tension d'apparition des décharges partielles (TADP) est plus élevée lorsque le diamètre des fils émaillés est plus petit. Par conséquent, la TADP augmente à mesure que le diamètre des fils émaillés diminue.

### 3.3. Mécanismes des Décharges Partielles et Résultats des Essais de la TADP pour Fils Émaillés 57

TABLE 3.2 – Données de la TADP pour les éprouvettes de 1,25 mm

	essai1	essai2	essai3	essai4	essai5	essai6	essai7	essai8	essai9	essai10	essai11	essai12	mediane	moyenne
EP1	613,4	616,8	620,4	616,5	615,3	622,6	616,8	616,6	619,7	616,5	620,9	617,2	616,8	617,72
EP2	612,3	615,7	613,4	616,5	617,6	618,8	618,4	620,8	618,3	615,6	620,4	617,8	617,7	617,13
EP3	618,2	612,4	612,8	620,2	618,4	621,9	616,6	622,3	615,8	616,7	622,4	618,4	618,3	618,01
EP4	619,4	617,8	619,3	613,9	617,9	619,8	610,8	610,8	610,2	614,8	614,7	611,3	614,75	615,06
EP5	610,5	601,3	595,8	604,7	597,5	602,6	599,5	608,3	599,2	602,6	601,7	599,7	601,5	601,95
EP6	608,5	600,4	606,6	609,5	597,8	608,2	615,2	608,7	607,9	608,3	610,2	606,8	608,25	607,34
EP7	609	600,4	600,2	599,5	606,5	610,2	598,3	608,5	609,9	607,8	610,6	606,2	607,15	605,59
EP8	610,2	609,5	600,2	610,3	601,6	610,4	607,5	601,4	610,5	606,4	607,5	607,4	607,5	606,91
EP9	612,1	608,4	610,1	610,8	615,5	609,9	608,4	606,5	610,5	613,7	608,5	610,6	610,3	610,41
EP10	609	604,6	600,7	606,3	610,4	600,7	612,2	605,3	614,2	606,6	605,2	609,4	606,45	607,05
EP11	611,5	602,2	593,9	600,2	611,4	591,5	591,5	606,4	591,3	605,2	600,6	602,4	601,4	600,67
EP12	592,8	592,8	593,5	601,2	592,2	594,4	591,3	596	601,6	590,6	597,3	601,2	593,95	595,41
EP13	614,5	601,4	590,5	604,9	602,4	612,3	603,5	601,2	607,5	603,8	601,9	602,5	603	603,86
EP14	607,7	614,5	601,7	605,9	602,2	600,4	594,5	600,1	600,5	600,2	594,6	595,4	600,45	601,47
EP15	614,5	616,2	615,5	607,7	608,3	606,4	609	607,2	608,2	609,5	612,3	612,2	609,25	610,58
EP16	610,2	607,2	606,5	604,4	607,5	606,4	608	607,2	607,5	609	612,5	611,8	607,5	608,18
EP17	601,4	591,3	595,8	594,2	596,5	593,5	594,6	593,6	596,6	597,2	593	595	594,8	595,22
EP18	602	598,8	594,2	595,3	597,5	593,6	590,8	595,8	590,3	588,9	596,4	594,8	595,05	594,86
EP19	603,1	588,5	591,5	587,4	597,5	594,1	596,5	593,8	594,1	601,5	599,4	602,2	595,3	595,8
EP20	610,5	597,4	606,5	601,5	602,2	596,3	606,5	603,4	596,5	604,5	603,5	595,8	602,8	602,05
EP21	616,6	612,5	604,7	605,3	606,6	606,9	610,7	606,7	608,5	606,5	605,7	607,5	606,8	608,18
EP22	591,1	597,2	580,5	584,5	597,6	595,5	591,5	595	587,2	595,2	586,5	589,4	591,3	590,93
EP23	592,8	593,5	591,3	591,5	596,7	595,4	595,7	595,5	595,3	593,8	593	601,5	594,55	594,66
EP24	592,2	595,4	594,1	592,5	588,8	591,4	594,5	594,3	591,2	592,5	591,5	588,5	592,35	592,24
EP25	590,9	593,7	580,5	594,1	595,5	591,5	592,5	592,4	594,1	594,2	588,4	593,1	592,8	591,74
EP26	612,2	610,6	607,4	614,2	606,9	610,1	605,5	606	610,9	615,2	614,5	609,4	610,35	610,24
EP27	606,8	594,5	592,8	595,2	594,2	591,4	594,6	593,7	592,2	592,1	596,2	590,5	593,95	594,51
EP28	596,2	594,7	595	596,3	593,8	603,2	596	594,8	591,5	601,1	589,3	593,8	594,9	595,47
EP29	614	600,1	601,1	602,5	601,8	608,4	592,3	600,4	592,7	594,2	592,8	593,2	600,25	599,46
EP30	608,5	592,9	592,3	600,9	606,2	600,1	605,4	601,5	601,7	600,9	592,5	600,4	600,9	600,27

TABLE 3.3 – Données de la TADP pour les éprouvettes de 0,5 mm

	essai1	essai2	essai3	essai4	essai5	essai6	essai7	essai8	essai9	essai10	essai11	essai12	mediane	moyenne
EP1	670,5	668,8	672,5	671,3	676,1	670,1	664,8	665,4	665,9	670,3	665,5	663,8	669,45	668,75
EP2	670,8	656,3	666,3	666,4	656,3	666,5	665,7	668,7	660,5	661,9	666,5	666,4	666,35	664,36
EP3	665,5	668,3	650,4	650,6	646,7	662,5	647,9	664	662,8	647,3	655,4	661,2	658,3	656,88
EP4	663,5	644,3	654,8	650,9	658,4	649,5	656,4	646,6	651,4	655,4	653,5	641,4	652,45	652,17
EP5	662,9	664,2	670,4	649,6	662,3	664,5	668,9	668,6	668,5	661,6	666,2	665,4	664,95	664,42
EP6	658,2	642,2	658,6	650,7	655,4	658,4	651,7	665,3	665,2	655,4	660,2	654,6	656,8	656,32
EP7	646,4	647,9	651,6	652,4	650,2	664,6	652,9	659,8	663,2	665,8	665,8	664,8	656,35	657,12
EP8	663,5	652,6	668,2	656,2	652,8	653,3	664,5	654,1	651,3	655,5	665,8	658,6	655,85	658,03
EP9	672,7	654,2	658,1	656,2	657,8	653,2	656,2	666,8	668,7	672	662,4	664,5	660,25	661,9
EP10	647,5	662,1	649,4	648,5	649	650,2	649,5	650,1	652,5	647,6	650,2	647,4	649,45	650,33
EP11	662	651,4	652,9	652	653,5	654,8	650,4	650,6	647	653,8	650,7	644,9	651,7	652
EP12	647	649,6	645,7	644,6	645,7	654,2	661,3	648,7	652,2	647,9	644,7	640	647,45	648,46
EP13	645,2	629,3	635,8	638,9	640,5	635,3	641,8	638,4	638,4	638,6	637,2	637,2	638,4	638,05
EP14	636,6	644,6	642,3	639,2	644,1	640,1	643,5	632,8	643,5	648,8	640	641,9	642,1	641,45
EP15	653,4	643,6	648,6	642,8	638	644,6	649,5	638,5	640,5	645,2	648,2	643,5	644,1	644,7
EP16	636,6	636,6	633,4	633,7	635,5	638,8	643,8	643,1	640,6	642,7	645,7	642,6	639,7	639,42
EP17	650,9	648,8	639,5	649,8	643,2	644,6	643,2	644,6	642	641,6	643	637,5	643,2	644,06
EP18	646,3	643,4	651,3	644,2	640,7	644,5	641,8	650,6	642,8	641,9	650,4	644,8	644,35	645,22
EP19	671,8	663,6	672	666,3	655,4	667,6	660,7	664,2	665,2	663,2	658,6	666,4	664,7	664,58
EP20	658,5	645,4	646	656,4	657,3	656,7	651,9	651,1	652,4	648,2	650	646,8	651,5	651,72
EP21	657,6	650,8	657	655,7	650,4	658,2	652,3	662,3	651,5	658,8	656,9	664,2	656,95	656,31
EP22	676,9	646,3	654,8	664,8	670,9	656,3	657,2	670,2	667,8	672,6	657,2	654,2	661	662,43
EP23	646,8	647,3	654,2	647,5	655,4	650,5	650,3	654,4	647,2	655,4	645,5	647,5	648,9	650,16
EP24	646,4	653,6	646,5	647,1	656,8	647,2	647,4	648,6	642,1	644,7	645,2	650,7	647,15	648,02
EP25	658,4	657,2	662,5	653,6	662,2	655,4	653,3	652,9	658,2	653,4	654,5	651,6	654,95	656,1
EP26	653,2	656,8	653,9	655,5	652,3	654,9	654,6	653,4	652,8	651,8	647,4	654,2	653,65	653,4
EP27	663,8	651,4	652,2	651,8	646,8	654,9	652,6	652,5	653,4	653,1	645,5	652,5	652,5	652,54
EP28	650,9	654,5	651	651,8	653,4	655	655,1	658,1	661,9	656,4	651,3	653,3	653,95	654,39
EP29	656,9	649,8	656,6	650,6	653,6	648,5	652,6	645,8	655,7	646,8	647,4	652,4	651,5	651,39
EP30	653,6	652,8	654,2	654,5	653,5	654,2	656,4	652,9	653,6	651,5	652,5	652,6	653,55	653,5

### 3.4 Résultats des tests de vieillissement accélérés

Les tableaux 3.4 et 3.5 présentent les résultats des tests de vieillissement accélérés effectués sur deux ensembles de 30 éprouvettes, de diamètres respectifs de 1,25 mm et 0,5 mm. Les mesures ont été réalisées à une fréquence de 1 kHz. Nous avons choisi cette fréquence maximale car c'est la limite de l'appareil, et cela permet d'accélérer le processus de vieillissement. Pour chaque éprouvette, les principaux paramètres enregistrés sont la fréquence, la tension de claquage et la durée de vie.

Ces tableaux montrent que l'augmentation du diamètre des fils émaillés entraîne une diminution de la tension de claquage et une augmentation de la durée de vie. En conséquence, les fils de 1,25 mm ont une durée de vie plus longue que ceux de 0,5 mm.

Les paramètres, à savoir les fréquences et les tensions de claquage, seront directement entrés dans le programme de cet appareil pour tester les éprouvettes. Chaque éprouvette claquera après un certain temps, correspondant à sa durée de vie sous cette tension et fréquence, et ce temps sera affiché dans le programme.

TABLE 3.4 – Tension de claquage et durée de vie des éprouvettes de diamètre de 1,25 mm

Échantillon (EP)	Tension de claquage (V)	Durée de vie (en heures)
EP1	1891,51	18 :10
EP2	1879,08	17 :24
EP3	1857,94	19 :25
EP4	1844,62	18 :20
EP5	1879,27	17 :22
EP6	1856,36	18 :37
EP7	1858,60	19 :44
EP8	1861,19	21 :41
EP9	1872,13	16 :10
EP10	1839,42	12 :39
EP11	1844,13	17 :27
EP12	1834,14	20 :31
EP13	1804,67	22 :35
EP14	1814,29	18 :03
EP15	1823,48	20 :26
EP16	1808,56	22 :55
EP17	1821,67	19 :42
EP18	1824,97	23 :16
EP19	1879,72	20 :17
EP20	1843,35	17 :56
EP21	1856,32	14 :36
EP22	1873,64	17 :38
EP23	1838,94	19 :07
EP24	1832,89	15 :55
EP25	1855,73	20 :14
EP26	1848,09	17 :06
EP27	1845,66	16 :19
EP28	1850,89	15 :16
EP29	1842,41	15 :58
EP30	1848,44	16 :47

TABLE 3.5 – Tension de claquage et durée de vie des éprouvettes de diamètre de 0,5 mm

<b>Échantillon (EP)</b>	<b>Tension de claquage (V)</b>	<b>Durée de vie (en heures)</b>
EP1	2184,98	3 :20
EP2	2174,55	3 :12
EP3	2128,21	3 :13
EP4	2147,27	3 :19
EP5	2141,08	3 :03
EP6	2145,74	3 :07
EP7	2158,14	3 :03
EP8	2146,24	3 :16
EP9	2123,71	2 :55
EP10	2105,08	2 :54
EP11	2134,99	2 :50
EP12	2126,53	3 :34
EP13	2158,74	3 :27
EP14	2150,25	2 :20
EP15	2104,44	3 :46
EP16	2103,17	4 :15
EP17	2106,47	3 :25
EP18	2128,57	3 :00
EP19	2150,25	3 :05
EP20	2089,26	2 :55
EP21	2102,46	2 :51
EP22	2093,89	2 :38
EP23	2092,12	3 :11
EP24	2157,53	2 :45
EP25	2101,93	3 :24
EP26	2105,32	3 :15
EP27	2122,29	2 :55

### 3.5 Valeurs des indicateurs après vieillissement

Après avoir soumis les éprouvettes aux tests de vieillissement accéléré, nous avons observé une variation notable des indicateurs mesurés, notamment la capacité et facteur de dissipation (D).

Le tableau 3.6 résume les valeurs des différents indicateurs après le vieillissement. Les éprouvettes utilisées dans ces tests ont été sélectionnées de manière aléatoire et ont subi des mesures d'impédance, de résistance, de facteur de dissipation et de capacité sur une large gamme de fréquences avant le vieillissement. D'après ce tableau, l'augmentation de la fréquence engendre une diminution de l'impédance et de la résistance, une stagnation de la capacité et du facteur des pertes diélectriques. En augmentant le diamètre, nous avons remarqué une légère diminution de l'impédance, de la résistance et du facteur de dissipation diélectrique, contrairement à la capacité qui augmente.

TABLE 3.6 – Valeurs d'indicateurs après vieillissement

Diamètre	Fréquence (kHz)	$20 \times 10^{-3}$	1	10	50	1000	2000
1,25mm	Z (k $\Omega$ )	$3,47 \times 10^5$	$2,66 \times 10^4$	$1,36 \times 10^3$	$2,67 \times 10^2$	$1,37 \times 10^1$	7,03
	$\theta$ (°)	46,91	89,70	89,55	89,37	89,21	89,35
	C (pF)	11,2	11,2	11,2	11,21	11,48	11,34
	D	$1,089 \times 10^{-2}$	$1,08 \times 10^{-2}$	$1,088 \times 10^{-2}$	$1,082 \times 10^{-2}$	$1,41 \times 10^{-2}$	$1,19 \times 10^{-2}$
	R ( $\Omega$ )	$2,12 \times 10^8$	$3,6 \times 10^5$	$9,87 \times 10^4$	$3,41 \times 10^3$	$1,86 \times 10^2$	$7,81 \times 10^1$
0,5mm	Z (k $\Omega$ )	$8,32 \times 10^4$	$1,04 \times 10^4$	$1,102 \times 10^3$	$2,98 \times 10^2$	$1,89 \times 10^1$	9,9
	$\theta$ (°)	99,02	70,3	72,45	77,53	85,43	86,63
	C (pF)	7,84	7,84	7,84	7,84	8,46	8,1
	D	$5,29 \times 10^{-2}$	$4,8 \times 10^{-2}$	$5,303 \times 10^{-2}$	$5,33 \times 10^{-2}$	$5,12 \times 10^{-2}$	$6,121 \times 10^{-2}$
	R ( $\Omega$ )	$1,78 \times 10^7$	$4,6 \times 10^6$	$3,28 \times 10^5$	$6,45 \times 10^4$	$1,53 \times 10^3$	$5,98 \times 10^2$

### 3.6 Résultats de la tension de claquage

Le tableau 3.7 présente les résultats des mesures de tension de claquage des éprouvettes avec le Breakdown Tester, ainsi que les capacités avant et après claquage mesurées avec l'Agilent 4980A.

TABLE 3.7 – Tension de claquage et capacité des éprouvettes de diamètre de 1,25 mm

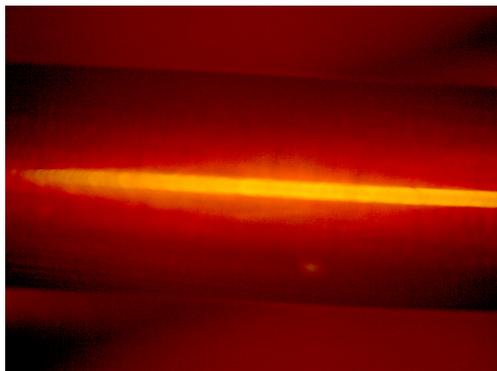
Éprouvette	Tension de claquage (V)	Capacité avant (pF)	Capacité après (pF)
EP31	12220	15,03	13,44
EP32	13198	14,35	14,17
EP33	13188	14,73	14,10
EP34	11467	14,49	12,90
EP35	12354	14,26	13,50
EP36	10175	14,63	12,10
EP37	13116	14,34	14,08
EP38	12180	14,73	13,43
EP39	12657	14,75	13,54
EP40	13307	15,19	14,23
EP41	12407	14,16	13,63
EP42	13182	14,61	14,09
EP43	12963	14,25	12,06
EP44	12268	14,44	13,64
EP45	13467	14,56	14,81
EP46	10907	13,95	12,45
EP47	12759	14,70	13,91
EP48	12604	14,83	13,51
EP49	13345	14,49	14,71
EP50	11016	15,14	13,86
Moyenne	12439	14,58	13,61

### 3.7 Analyse microscopique des torsades avant et après le vieillissement

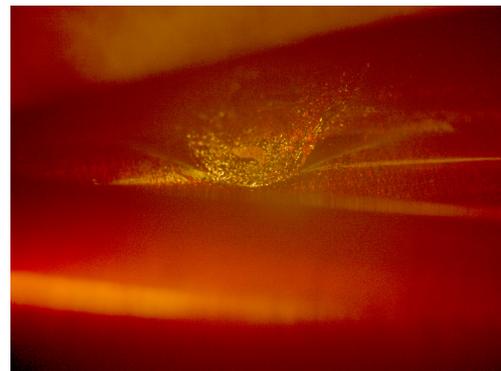
Les images prises avec le microscope Axiocam ERC 5 montrent clairement que le matériau s'est dégradé au fil du temps, notamment au niveau de la torsade. Avant le vieillissement, la surface apparaît plus lisse et uniforme, indiquant un matériau bien conservé. Après le vieillissement, la surface présente des signes de rugosité et d'irrégularités, suggérant une dégradation physique, possiblement par fissuration ou usure, ainsi qu'une oxydation ou une dégradation chimique. Ces altérations montrent une perte d'intégrité du matériau, ce qui pourrait affecter ses performances et sa fiabilité, surtout dans les zones soumises à des concentrations de stress élevées comme la torsade[75].

Dans notre cas, le vieillissement est électrique, introduisant un mécanisme de vieillissement lié à la dilatation et la contraction du matériau conducteur (cuivre) et des couches de l'isolation. Cet effet mécanique devient plus important après un certain nombre de cycles, lorsque les couches de PEI et de PAI durcissent pendant le vieillissement. Aux contraintes mécaniques dues aux dilatations s'ajoutent celles résultant des forces de compression appliquées entre les fils des éprouvettes torsadées pendant leur fabrication. Leur action sur des couches isolantes fragilisées mécaniquement par les contraintes thermiques conduit à la formation de microfissures internes, jusqu'à l'apparition des fissures macroscopiques qui servent de points de départ pour l'amorçage des décharges partielles (DP) et peuvent aboutir au claquage [77].

La figure 3.5 (A) illustre la torsade de l'éprouvette avant le vieillissement, tandis que la figure 3.5 (B) montre la torsade de l'éprouvette de diamètre 1,25 mm après le vieillissement, où l'on voit bien la dégradation.



(A) Image d'une torsade dans son état initial, avant le processus de vieillissement de diamètre de 1,25 mm



(B) Image de la torsade après le processus de vieillissement, dans son état final de diamètre de 1,25 mm

FIGURE 3.5 – Analyse Comparative de la Torsade Avant et Après Vieillissement

### 3.8 Mesure de l'épaisseur de l'isolant

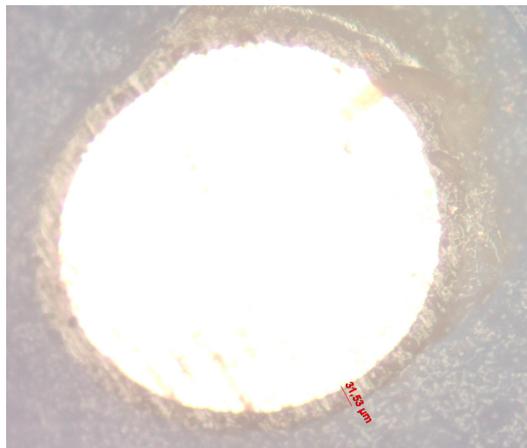
Pour évaluer l'impact du vieillissement sur l'échantillon, nous avons mesuré l'épaisseur de l'isolant de l'éprouvette de diamètre 1,25 mm et de diamètre 0,5 mm avant et après le vieillissement. Ces mesures, effectuées par le logiciel du microscope Axiocam ERC 5, permettent de quantifier la dégradation et de mieux comprendre les effets des conditions environnementales sur les propriétés physiques de l'isolant. Les données recueillies sont présentées dans le tableau 3.8 et les photos illustratives des échantillons sont montrées sur la figure 3.6, où l'on observe les valeurs de l'épaisseur de la couche de l'isolant.

TABLE 3.8 – Épaisseurs de l'isolant mesurées avant et après le vieillissement

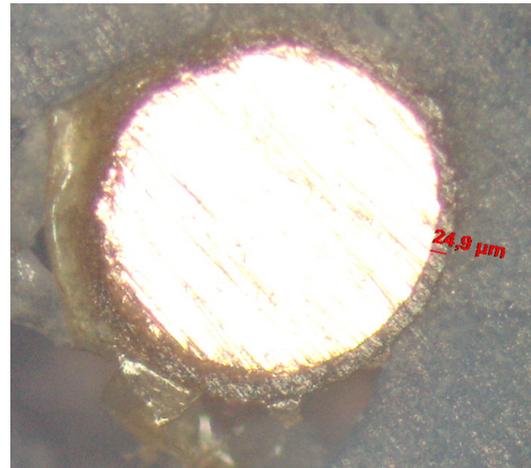
Diamètre (mm)	Épaisseurs mesurées (mm)			
	0,5	<b>avant vieillissement</b>	31,53	33,76
<b>après vieillissement</b>		27,71	24,9	27,74
1,25	<b>avant vieillissement</b>	44,82	47,92	48,12
	<b>après vieillissement</b>	43,1	40,7	41,96

Nous remarquons que la diminution de l'épaisseur de l'isolant après le vieillissement électrique est causée par plusieurs facteurs. Les champs électriques élevés peuvent induire des stress électromécaniques dans l'isolant, provoquant des déformations permanentes. Les décharges partielles (DPs), se produisant dans les zones faibles de l'isolant, créent des canaux de dégradation qui érodent progressivement le matériau, réduisant ainsi son diamètre. De plus, les décharges corona, générées à la surface ou près de la surface de l'isolant sous des tensions élevées, produisent des ions et des radicaux libres qui attaquent chimiquement l'isolant, causant une érosion progressive. Enfin, le chauffage par effet Joule, résultant du passage de courants électriques à travers l'isolant, accélère les processus de dégradation thermique, contribuant à la réduction du diamètre.

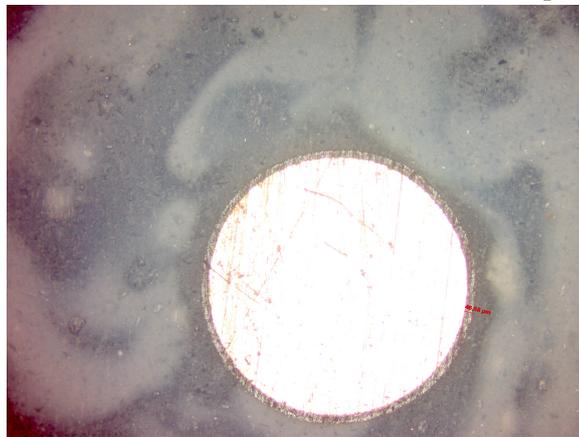
Par ailleurs, une publication [78] explique que la grande conductivité du cuivre et de l'oxyde de cuivre formé à l'interface cuivre/polymère provoque également une diminution de l'épaisseur globale de l'isolant. Les charges électriques libres dans le cuivre bombardent les chaînes du polymère, transmettant suffisamment d'énergie pour briser certaines liaisons de valence. Cela forme des cavités microscopiques sur la surface de contact cuivre-polymère [79], réduisant encore l'épaisseur de l'isolant. Ces cavités peuvent également provoquer des intensifications locales du champ électrique, favorisant l'initiation des décharges partielles.



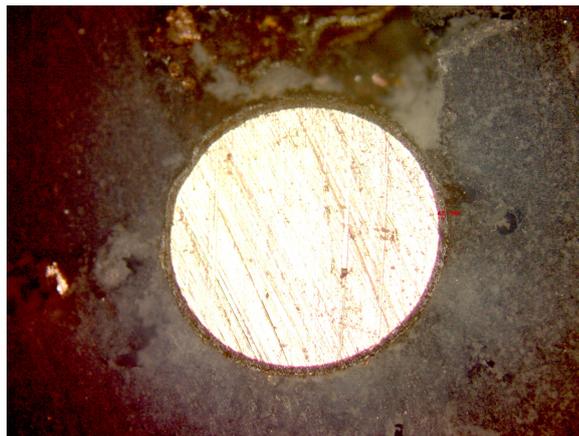
(A) Épaisseur de l'isolant du fil de diamètre 0,5 mm avant le vieillissement.



(B) Épaisseur de l'isolant du fil de diamètre 0,5 mm après le vieillissement.



(C) Épaisseur de l'isolant du fil de diamètre 1,25 mm avant le vieillissement.



(D) Épaisseur de l'isolant du fil de diamètre 1,25 mm après le vieillissement.

FIGURE 3.6 – Épaisseur de l'isolant des fils de différents diamètres avant et après le vieillissement

### 3.9 Capacité des éprouvettes des fils émaillés de 1,25 mm de diamètre de en fonction de la fréquence

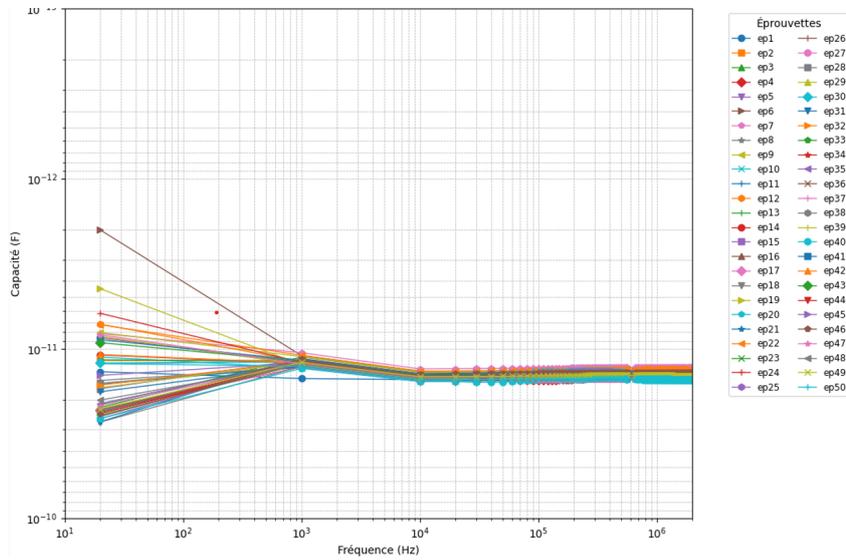


FIGURE 3.7 – Capacité des fils émaillés mesuré avant le vieillissement à l'aide de l'analyseur Agilent 4890A en fonction de la fréquence

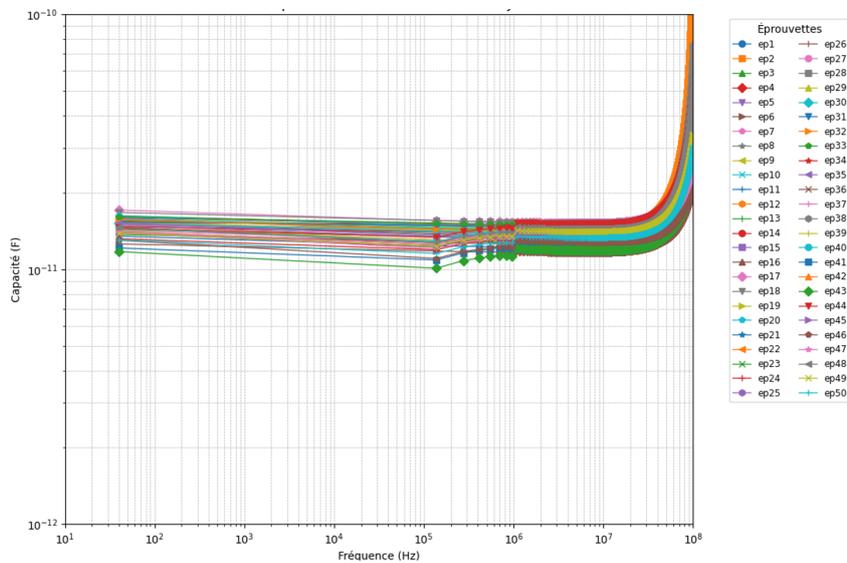


FIGURE 3.8 – Capacité des fils émaillés mesuré avant le vieillissement à l'aide de l'analyseur Agilent 4294A en fonction de la fréquence

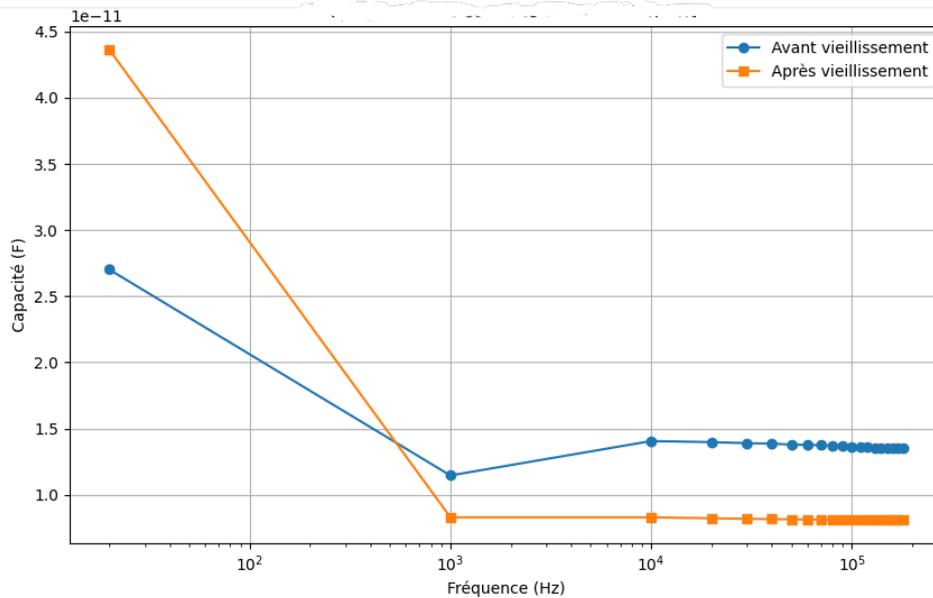


FIGURE 3.9 – Variation de capacité en fonction de la fréquence avant et après vieillissement électrique pour un fil émaillé de diamètre 1,25 mm

L'analyse de la figure 3.9, basée sur les données du tableau 3.1 et réalisée avec l'analyseur 4980A, montre que les tests électriques effectués sur le fil émaillé d'un diamètre de 1,25 mm ont produit des résultats similaires à ceux observés dans cette étude [80]. Cette similitude indique que les propriétés électriques du fil émaillé sont cohérentes avec celles mesurées directement par des tests électriques.

Après le claquage, un phénomène significatif se produit : la dégradation de l'isolant entraîne une réduction de la surface de contact avec l'air ambiant. Cette réduction de la zone de contact effective peut être un facteur clé contribuant à la diminution de la capacité mesurée du fil émaillé. Les dégradations dans l'isolant suite au claquage peuvent créer des zones de faiblesse ou des altérations superficielles qui interfèrent avec la réponse capacitive du matériau.

Une théorie alternative suggère que le vieillissement des émaux polymériques devrait entraîner une diminution globale de la capacité mesurée de l'émail [81]. Cependant, selon des études antérieures [82], suivant la procédure standard de la norme IEC 60851-5, la capacité a été observée en augmentation au cours du processus de vieillissement. Ce résultat est contradictoire et nécessite une vérification approfondie. La différence pourrait résulter de conditions de vieillissement différentes utilisées dans les études respectives.

Trois éprouvettes de diamètre 0,5 mm ont été analysées pour leurs variations de capacité lors d'un vieillissement, induit par un claquage. La première éprouvette a montré une capacité initiale de 9,12 pF, augmentant à 9,53 pF après 1 heure avant de diminuer à 9,00 pF après le claquage. Pour la deuxième éprouvette, la capacité est passée de 9,21 pF à 9,41 pF après 1 heure, puis a chuté à 6,31 pF après le claquage. Quant à la troisième, elle a augmenté de 10,21 pF à 10,75 pF après 1 heure, pour finalement atteindre 10,02 pF après le claquage.

Ces variations indiquent des modifications internes dans l'isolant dues aux cycles de stress électrique, entraînant des changements temporaires avant la dégradation finale. Les mesures de l'épaisseur des éprouvettes avant et après le vieillissement électrique (tableau 3.8) montrent une diminution de l'épaisseur, mais la permittivité des matériaux reste inconnue. Les modifications internes incluent la polarisation et la dépolarisation des molécules sous l'effet du champ électrique, des réactions chimiques provoquant des altérations structurelles, la formation de microfissures créant des chemins de fuite pour le courant, des changements de structure cristalline ou amorphe affectant les propriétés diélectriques, l'accumulation de charges dans certaines régions perturbant la capacité, et des effets thermiques entraînant des variations temporaires de la capacité. Une analyse plus approfondie de la diminution de la capacité après le claquage est nécessaire. Des résultats similaires ont été trouvés dans cette étude [80], soulignant l'importance de comprendre les mécanismes sous-jacents aux variations de capacité pendant et après le processus de vieillissement.

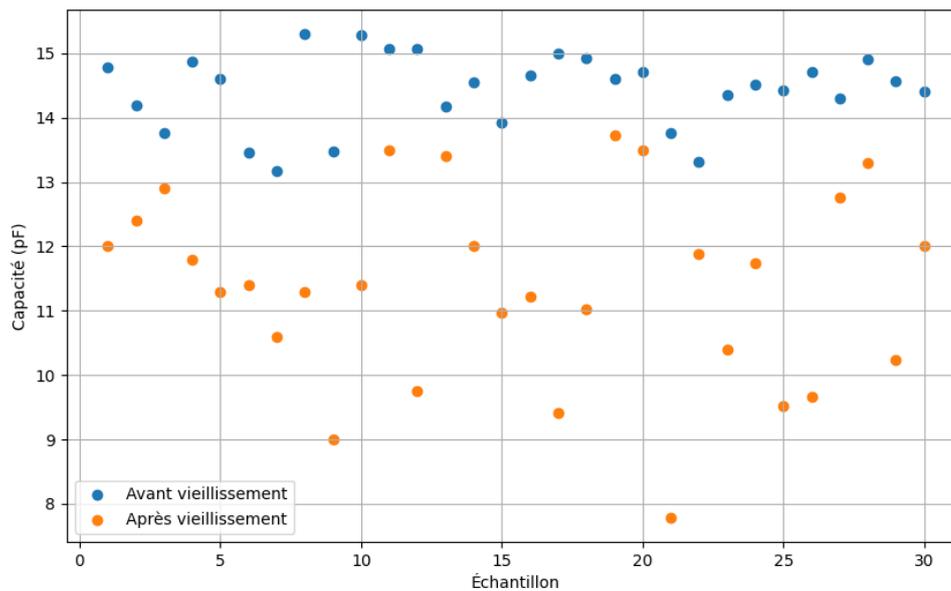


FIGURE 3.10 – Variations de capacité en fonction de la fréquence avant et après le vieillissement électrique de diamètre 1,25 mm pour les 30 éprouvettes

Ainsi, l'observation des variations de capacité pour les 30 éprouvettes de 1,25 mm sur la figure 3.4, réalisée avec l'analyseur Agilent 4980A, démontre une diminution de capacité pour toutes les éprouvettes après le vieillissement à une fréquence de 1 kHz. Même avec une population donnée, la capacité reste un indicateur fiable de l'état du fil après la dégradation.

### 3.10 Facteur de dissipation ( $D$ ) en fonction de la fréquence avant et après le vieillissement électrique

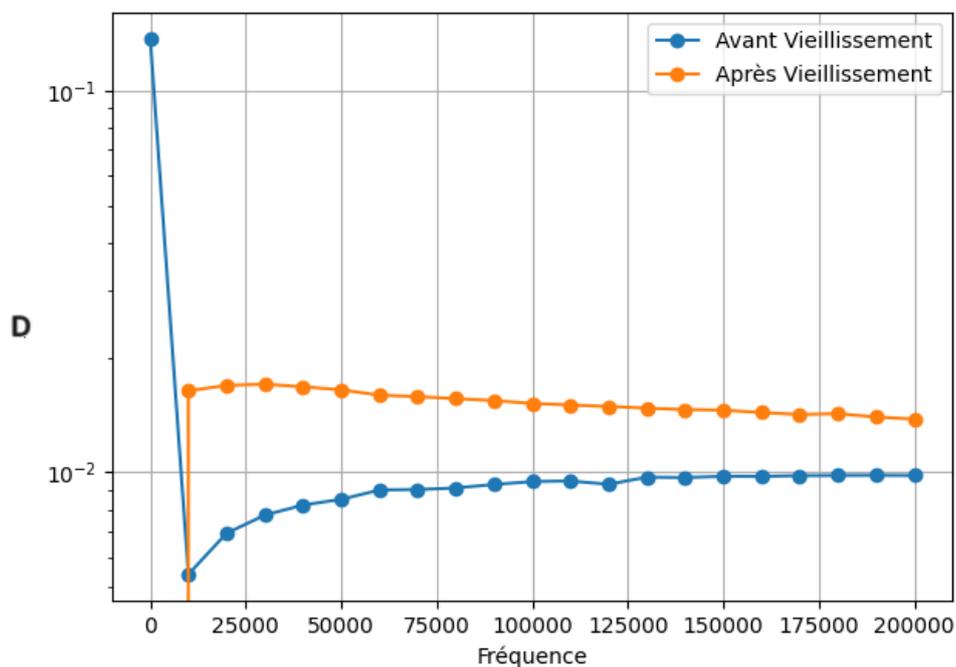


FIGURE 3.11 – Variation du facteur de dissipation en fonction de la fréquence avant et après vieillissement électrique pour un fil enroulé de 1,25 mm

L'augmentation du facteur de dissipation ( $D$ ) après le vieillissement, corrélée à la diminution de capacité, peut être expliquée par les changements complexes induits dans la structure et les propriétés électriques de l'isolant. Au fil du vieillissement, divers phénomènes peuvent survenir, tels que la formation de défauts internes, l'accumulation de charges, ou encore des altérations dans la permittivité du matériau. Ces altérations peuvent conduire à une augmentation de la polarisation interfaciale et à une augmentation de la dissipation d'énergie, mesurée par le facteur de dissipation ( $D$ ).

### 3.11 Variation de la TADP

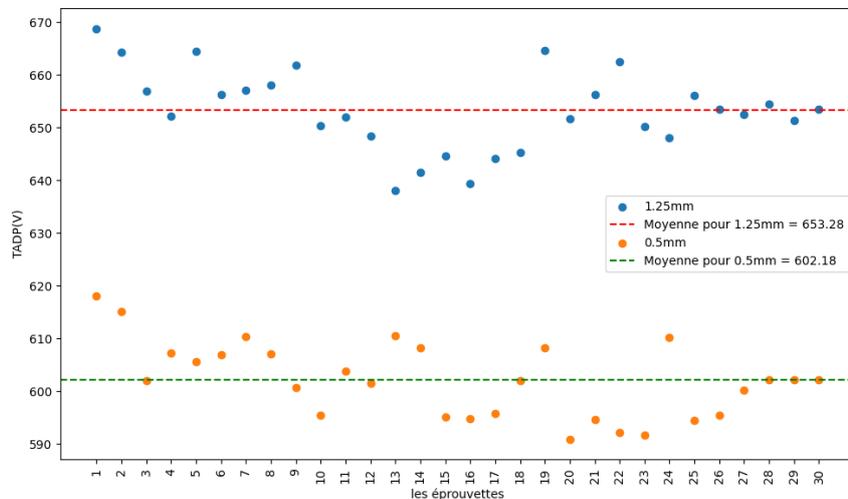


FIGURE 3.12 – TADP pour les éprouvettes de diamètres de 1,25 mm et 0,5 mm

Les résultats présentés sur la figure 3.12 illustrent les valeurs de la TADP pour les diamètres de fils émaillés de 1,25 mm et 0,5 mm, mesurées à l'aide d'un appareil de cage de Faraday. Les données, extraites des tableaux 3.2 et 3.3 et représentées sous forme de nuages de points, montrent les valeurs de la TADP en fonction du diamètre du fil. Les points bleus correspondent aux fils de 1,25 mm, tandis que les points oranges correspondent aux fils de 0,5 mm. Les lignes pointillées horizontales indiquent les valeurs moyennes pour chaque diamètre, avec une TADP de 653,28 V pour les fils de 1,25 mm et de 602,18 V pour les fils de 0,5 mm.

L'analyse des données révèle que le diamètre plus grand de 1,25 mm entraîne une dispersion plus étendue des valeurs de TADP, illustrant ainsi une distribution plus large du champ électrique autour du fil. Cela signifie que les fils de 1,25 mm dispersent la charge sur une plus grande surface, réduisant ainsi la densité de charge à leur surface et diminuant la probabilité de décharge partielle à des tensions plus basses.

En revanche, les fils de 0,5 mm montrent une dispersion plus concentrée des valeurs de TADP, suggérant une densité de champ électrique plus intense dans une zone plus restreinte autour du fil. Cela indique que ces fils peuvent accumuler plus facilement des charges électriques à leur surface à une tension donnée, augmentant ainsi le potentiel de décharge partielle.

L'étude comparative des valeurs de TADP confirme également que le TADP diminue à mesure que le diamètre du fil diminue, ce qui implique que les fils de plus grand diamètre nécessitent généralement une tension de claquage plus élevée pour atteindre des niveaux comparables de décharge partielle.

Lorsque l'épaisseur de l'isolant est doublée, la TADP augmente de près de 40% [83]. Ces résultats confirment que le diamètre des fils et l'épaisseur de l'isolant sont des facteurs déterminants dans les propriétés diélectriques des matériaux utilisés dans les bobinages, influençant directement la tension de claquage et la TADP. En

effet, comme le montre le tableau 3.8, l'épaisseur de l'isolant augmente proportionnellement avec le diamètre du fil. Ainsi, une augmentation du diamètre du fil entraîne une augmentation de l'épaisseur de l'isolant, ce qui tend à augmenter également la TADP.

### 3.12 Capacité des fils émaillés

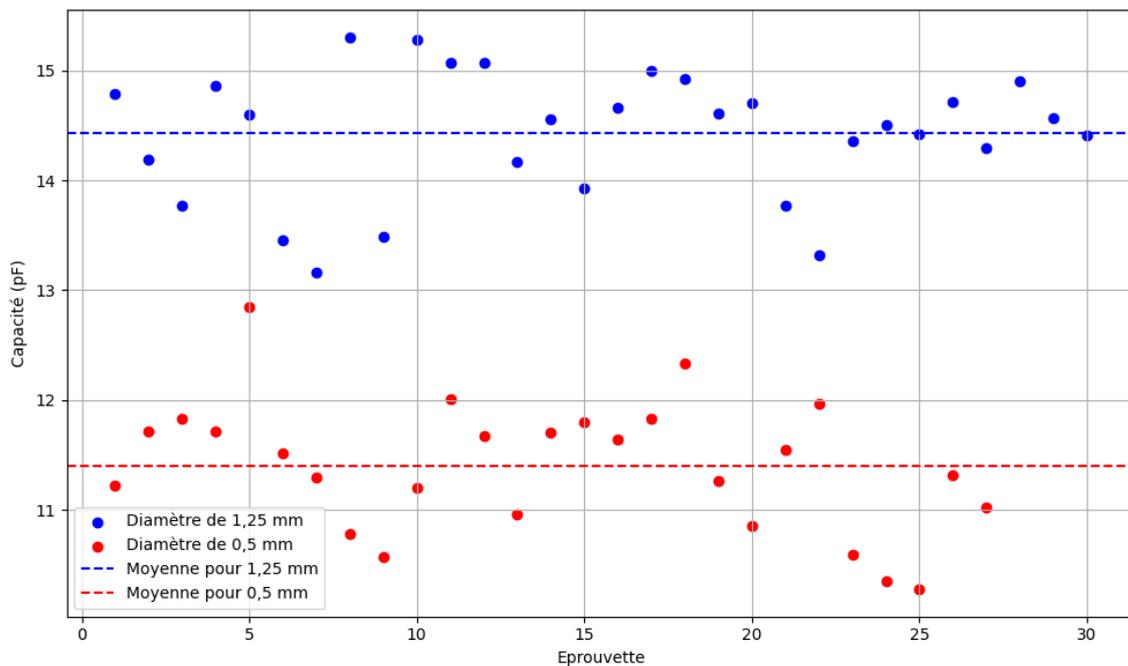


FIGURE 3.13 – Capacité des échantillons de fils émaillés de différents diamètres à 1 kHz avant vieillissement

Les caractéristiques de la figure 3.13 illustrent la variation de la capacité entre des fils de diamètres de 1,25 mm et 0,5 mm. mesurées à l'aide de l'analyseur Agilent 4980A. Nous constatons que les fils de 1,25 mm présentent une variation de capacité dans l'intervalle [13-15] pF, tandis que ceux de 0,5 mm montrent une variation dans l'intervalle [10-13] pF.

L'analyse des données révèle que les fils de diamètre plus grand (1,25 mm) tendent à avoir une capacité moyenne plus élevée par rapport aux fils de plus petit diamètre (0,5 mm). Cette différence pourrait être attribuée à l'augmentation de la surface de l'isolant, ce qui permet une plus grande accumulation de charge et donc une capacité plus élevée. De plus, l'épaisseur de l'isolant joue un rôle crucial, car elle influence directement la capacité. D'après les observations faites dans notre étude, un fil de plus grand diamètre contient une plus grande épaisseur d'isolant. Ainsi, le diamètre et l'épaisseur de l'isolant sont des paramètres clés qui déterminent les propriétés capacitatives des fils utilisés dans les bobinages électriques.

### 3.13 Tension de claquage et durée de vie

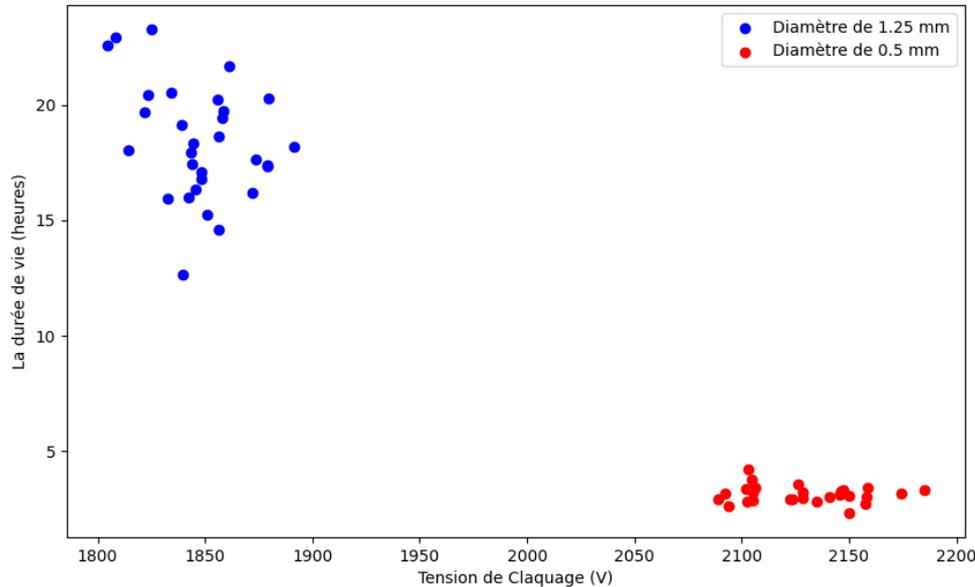


FIGURE 3.14 – Courbe de la durée de vie en fonction du tension de claquage

L'analyse de la figure 3.14 montre la durée de vie en fonction de la tension de claquage appliquée aux 30 éprouvettes de 1,25 mm et aux 27 éprouvettes de 0,5 mm, données prises des tableaux 3.4 et 3.5. Les fils de plus petit diamètre 0,5 mm présentent une durée de vie plus courte par rapport aux fils de plus grand diamètre 1,25 mm. Cette différence est principalement due à une résistance plus faible à la tension de claquage des fils de petit diamètre.

Les fils de plus petit diamètre ont une surface de contact réduite, ce qui limite la capacité de l'isolant à accumuler et répartir les charges électriques. Cela entraîne une concentration accrue du champ électrique, accélérant ainsi la dégradation de l'isolant. L'épaisseur réduite de l'isolant dans les fils de petit diamètre augmente l'intensité du champ électrique à travers l'isolant, augmentant ainsi le risque de claquage électrique et diminuant la durée de vie du fil.

Le coefficient de corrélation entre la durée de vie et la tension de claquage appliquée est de 2 % pour les fils de diamètre 0,5 mm. Pour les fils de diamètre 1,25 mm, le coefficient de corrélation est de 0 %. Cela indique qu'il n'y a pratiquement aucune corrélation entre la durée de vie et la tension de claquage pour les fils de plus grand diamètre.

Lors des tests, une tension de 2 fois la tension de claquage nominale ( $2 \times pdiv$ ) a été appliquée à chaque échantillon de 1,25 mm, et une tension de 2,5 fois la tension de claquage nominale ( $2,5TADP$ ) a été appliquée à chaque échantillon de 0,5 mm. Les tests ont révélé des différences significatives dans la distribution de la durée de vie des fils de même diamètre, même classe thermique et même grade. Ces

résultats suggèrent que, malgré des conditions de test similaires, d'autres facteurs influencent la durée de vie des échantillons.

### 3.14 Analyse de la corrélation entre la TADP et la durée de vie

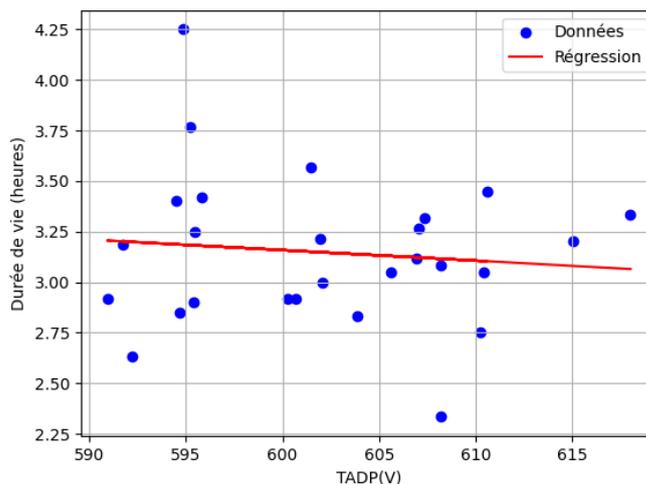


FIGURE 3.15 – Régression linéaire entre la TADP et la durée de vie des éprouvettes de 0,5 mm de diamètre

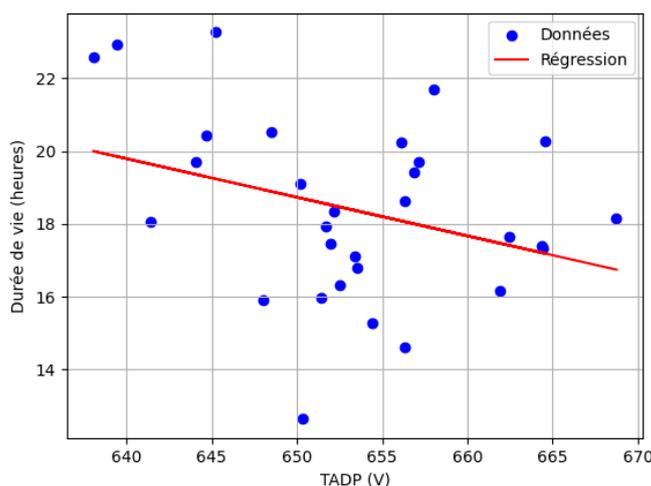


FIGURE 3.16 – Régression linéaire entre la TADP et la durée de vie des éprouvettes de 1,25 mm de diamètre

Les figures 3.15 et 3.16 montrent des régressions linéaires entre TADP et la durée de vie pour des éprouvettes de diamètres différents, respectivement 1,25 mm et 0,5

mm. Pour les fils de 1,25 mm, la régression linéaire donne un coefficient de détermination de 11%, tandis que pour les fils de 0,5 mm, le coefficient de détermination n'est que de 1%. Ces résultats indiquent qu'il n'y a pas de corrélation significative entre la TADP et la durée de vie pour les deux types de fils. Ces résultats mettent en évidence que, bien que la TADP puisse fournir des informations sur l'état initial des isolants, il ne suffit pas pour prédire efficacement la durée de vie des éprouvettes. Les variations dans la distribution de la durée de vie observées dans les deux diamètres montrent que des facteurs supplémentaires, tels que les conditions de vieillissement et les processus de fabrication, doivent être considérés pour une évaluation plus complète et précise de la durabilité des isolants électriques.

### 3.15 Analyse de la corrélation entre capacité et durée de vie

Pour analyser la relation entre la capacité et la durée de vie des éprouvettes, nous avons utilisé la variation relative de la capacité, notée  $\Delta C$ .

$$\Delta C = \frac{C_{\text{avant-vieillessement}} - C_{\text{apres-vieillessement}}}{C_{\text{avant-vieillessement}}} \times 100 \quad (3.1)$$

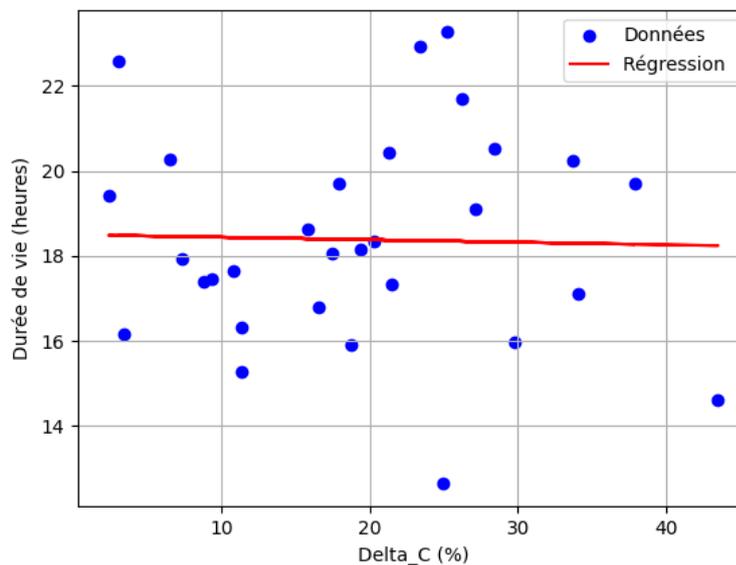


FIGURE 3.17 – Régression linéaire entre capacité et la durée de vie des éprouvettes de 1,25 mm de diamètre

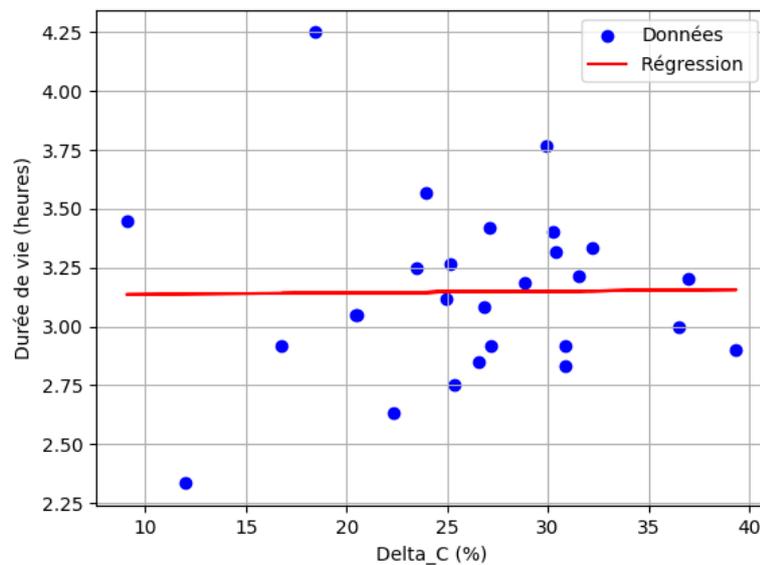


FIGURE 3.18 – Régression linéaire entre capacité et la durée de vie des éprouvettes de 0,5 mm de diamètre

Les figures 3.17 et 3.18 montrent les régressions linéaires entre la durée de vie et ( $\Delta C$ ) tel que pour des éprouvettes de diamètres respectifs de 1,25 mm et 0,5 mm. Pour les éprouvettes de 1,25 mm, la régression linéaire présente une ligne presque horizontale, indiquant une absence de corrélation significative entre la durée de vie et ( $\Delta C$ ). Cela suggère que, pour ces éprouvettes, les variations de capacité avant et après vieillissement n'ont qu'un impact négligeable sur la durée de vie. De même, pour les fils de 0,5 mm, la régression montre également une ligne presque horizontale, révélant une relation très faible entre la durée de vie et ( $\Delta C$ ). Ces résultats impliquent que, pour les deux diamètres,  $\Delta C$  n'est pas un bon indicateur de la durée de vie, et d'autres facteurs non analysés ici pourraient être plus influents. Cette faible corrélation observée dans les figures suggère que ces changements capacitaires ne suffisent pas à expliquer la variation de la durée de vie des éprouvettes. Malgré le fait que  $\Delta C$  ait donné de bonnes corrélations avec la durée de vie lors de vieillissements thermiques, dans notre cas de vieillissement électrique, on ne trouve pas de bonnes corrélations. Cela pourrait indiquer que les mécanismes de dégradation sous contrainte électrique sont différents de ceux sous contrainte thermique. Pour améliorer la compréhension de ces corrélations, il serait nécessaire de travailler avec un large échantillon d'éprouvettes ou de prendre une seule éprouvette et de suivre les changements de capacité sur une période prolongée. En effectuant des mesures répétées sur une plus grande durée, on pourrait potentiellement observer des tendances plus claires et établir des corrélations plus significatives entre  $\Delta C$  et la durée de vie des isolants sous contraintes électriques.

### 3.16 Corrélation entre la tension de claquage et la capacité après vieillissement

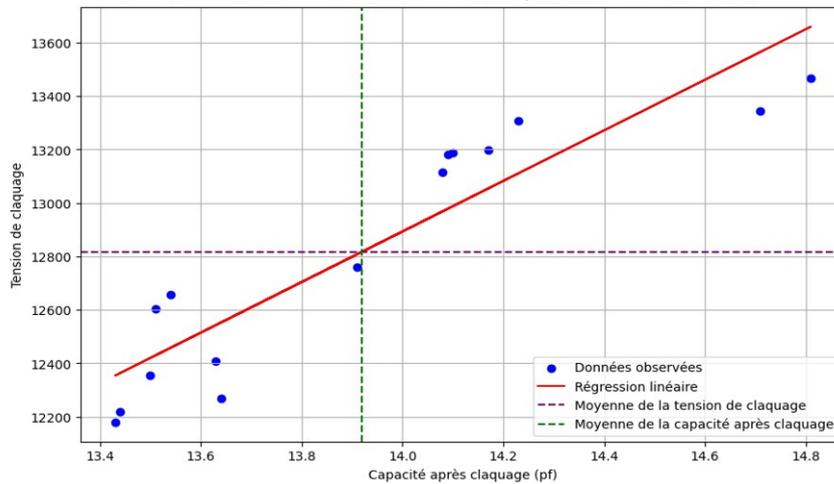


FIGURE 3.19 – Corrélation entre la Tension de Claquage et la Capacité après Vieillessement pour des Éprouvettes de 1,25 mm de Diamètre..

Les résultats de notre étude montrent une corrélation significative de 84% entre la tension de claquage et la capacité après vieillissement pour les 20 éprouvettes testées, comme indiqué dans le tableau 3.7. Cette forte corrélation suggère que la capacité mesurée après le vieillissement électrique est un indicateur fiable de la tension de claquage des isolants électriques. La relation étroite entre ces deux variables peut être attribuée à la dégradation de l'isolant sous l'effet des contraintes électriques, affectant sa capacité à résister à la tension de claquage. La capacité après vieillissement, qui diminue en raison de la réduction de la surface de contact effective et de l'augmentation des défauts internes, reflète directement l'état de dégradation de l'isolant. reste un indicateur pertinent pour la prédiction de la tension de claquage et l'évaluation de la performance et de la fiabilité des isolants électriques après vieillissement.

Cette étroite corrélation entre la capacité et la tension de claquage est soutenue par les travaux antérieurs du LSEE, qui ont montré que la dégradation de l'isolation inter-spores modifie le comportement global du bobinage en haute fréquence [84, 85, 85]. Ces études préliminaires ont également révélé une corrélation entre la variation de la capacité avec le vieillissement et la résistance à la tension de claquage [86]. Ainsi, comprendre la dynamique de la capacité après vieillissement permet non seulement de prédire la performance de l'isolant, mais aussi de diagnostiquer efficacement les effets du vieillissement électrique sur sa fiabilité à long terme.

### 3.17 Loi de puissance inverse et vieillissement électrique

Les résultats obtenus pour les 30 éprouvettes de PDIV, spécifiquement pour celles de diamètre 1.25 mm avec  $k = 6503.054$  et  $n=0.906$ , mettent en évidence une corrélation inverse entre TADP et la durée de vie des isolants. Cette observation est conforme aux prédictions théoriques de la loi de puissance inverse :

$$Duredevie = k \times (TADP)^{-n} \quad (3.2)$$

Selon cette loi, une diminution significative de la durée de vie est attendue avec l'augmentation de la TADP. Cependant, malgré la cohérence avec la théorie, des disparités subsistent entre les durées de vie mesurées pour des éprouvettes de caractéristiques similaires, suggérant des variations intrinsèques dans les matériaux ou des influences externes non prises en compte par le modèle actuel.

De plus, l'évaluation des modèles à l'aide du coefficient de détermination  $R^2$  montre que celui-ci est de 0.0461 pour nos données expérimentales. Ce faible  $R^2$  indique que notre modèle actuel explique seulement environ 5% de la variance observée dans les durées de vie mesurées. Cette constatation souligne les limites actuelles de notre compréhension et des modèles utilisés pour prédire le vieillissement électrique des isolants. Il est donc crucial d'explorer d'autres variables et d'incorporer des approches plus sophistiquées, comme l'intégration de cycles TADP personnalisés, pour améliorer la précision et la fiabilité des prédictions de durée de vie.

### 3.18 Conclusion

En conclusion, l'analyse approfondie des données et l'interprétation des courbes pour les éprouvettes de différents diamètres ont mis en évidence des variations significatives dans les propriétés diélectriques des isolants électriques soumis à des contraintes électriques. Les résultats montrent que la capacité et la tension de claquage sont fortement influencées par le vieillissement électrique, avec des altérations observées avant et après les tests. L'augmentation du facteur de dissipation  $D$  et les variations de la TADP indiquent des changements substantiels dans les propriétés électriques, soulignant l'importance de comprendre ces phénomènes pour améliorer la fiabilité des systèmes électriques.

Pour progresser, l'intégration de modèles physiques avancés combinés à des techniques d'intelligence artificielle pourrait offrir une meilleure prédiction de la durée de vie des isolants électriques. Cette approche permettrait de modéliser de manière plus précise les interactions complexes entre les matériaux, l'épaisseur microscopique de l'isolant, les conditions de test et les propriétés diélectriques. Elle ouvrirait ainsi la voie à des améliorations significatives dans la conception et la durabilité des systèmes électriques.

## **Chapitre 4**

# **Modélisation par intelligence artificielle et perspectives**

## 4.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de prédire la durée de vie des éprouvettes torsadées en utilisant l'intelligence artificielle (IA), notamment à travers des techniques d'apprentissage automatique. Nous avons exploré différents modèles prédictifs dans un environnement Python, en nous appuyant sur des indicateurs tels que la capacité, la résistance et le facteur de dissipation. Ce langage de programmation est largement préféré pour les applications d'IA en raison de sa simplicité, de sa polyvalence et de la richesse de ses outils spécialisés. Ce chapitre présente également les principales bibliothèques et frameworks logiciels qui facilitent le développement et l'implémentation de ces modèles.

Nous examinerons d'abord Python et son écosystème, en mettant en avant sa polyvalence et sa richesse en outils spécialisés pour l'intelligence artificielle (IA). Ensuite, nous nous concentrerons sur deux bibliothèques clés utilisées dans le domaine de l'apprentissage automatique : Scikit-Learn, une bibliothèque essentielle pour la mise en œuvre de modèles prédictifs grâce à sa simplicité et sa robustesse, et XGBoost, un framework reconnu pour son efficacité dans les méthodes de boosting basées sur les arbres. Nous explorerons également Support Vector Regression (SVR), une technique puissante pour la régression, intégrant ces outils pour le traitement, l'analyse des données et l'évaluation des performances des modèles prédictifs développés.

## 4.2 Méthodologie

### 4.2.1 Bibliothèques et Frameworks Logiciels

#### 4.2.1.1 Python

Python est un langage de programmation largement utilisé dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA). Sa simplicité, sa polyvalence et ses vastes bibliothèques et frameworks en font un choix populaire pour le développement d'applications d'IA. Python offre une gamme étendue d'outils et de fonctionnalités essentiels à la création d'applications et de systèmes d'IA, incluant le deep learning, la manipulation de données, et les calculs numériques. Sa communauté active et le soutien solide dont il bénéficie contribuent également à sa popularité et à son adoption croissante dans le domaine de la technologie émergente.

Grâce à Python, les développeurs peuvent concevoir des solutions avancées en intelligence artificielle, tirant parti de ses capacités flexibles pour manipuler les données, former des modèles prédictifs sophistiqués, et déployer des applications à grande échelle. En outre, la facilité d'apprentissage de Python et sa syntaxe claire permettent aux débutants comme aux experts de travailler efficacement sur des projets complexes. Que ce soit pour l'analyse de données, la vision par ordinateur, le traitement du langage naturel ou d'autres applications d'IA, Python offre un environnement robuste et évolutif, soutenu par une vaste communauté de développeurs et de chercheurs dédiés à l'innovation technologique [87].

### 4.2.1.2 Scikit-learn

Scikit-Learn est la bibliothèque de machine learning la plus utilisée en Python, offrant une vaste gamme de fonctionnalités indispensables. À travers le monde, le machine learning joue un rôle crucial dans de nombreuses entreprises, leur permettant de se démarquer et d'obtenir un avantage concurrentiel. Scikit-Learn se distingue par ses divers outils d'apprentissage automatique et de modélisation statistique. Conçu pour fonctionner harmonieusement avec d'autres bibliothèques Python gratuites, comme NumPy et Pandas, Scikit-Learn simplifie l'intégration et la manipulation des données, augmentant ainsi l'efficacité globale du processus d'analyse. Il inclut des fonctions pour estimer les arbres de décision, les forêts aléatoires, les régressions logistiques et les régressions par vecteur de support.

### 4.2.1.3 XGBoost

XGBoost est un algorithme d'apprentissage automatique par gradient boosting largement utilisé pour la régression et la classification. Il combine plusieurs modèles de prédiction faibles (généralement des arbres de décision peu profonds) pour améliorer la précision prédictive. Voici quelques points clés sur XGBoost [88] :

#### Fonction de prédiction :

$$\hat{y}_i = \phi(x_i) = \sum_{k=1}^K f_k(x_i)$$

- $\hat{y}_i$  est la prédiction pour l'observation  $i$ .
- $\phi(x_i)$  est la fonction de prédiction combinée.
- $f_k(x_i)$  est la fonction de prédiction du  $k$ -ème arbre de décision.

#### Fonction de perte régularisée :

XGBoost minimise une fonction de perte régularisée qui comprend à la fois la perte de prédiction et une régularisation pour contrôler la complexité du modèle.

### 4.2.1.4 Support Vector Regression (SVR)

Support Vector Machine (SVM) est un algorithme simple et efficace avec des coûts de calcul réduits. En régression, SVM fonctionne en trouvant un hyperplan dans un espace à  $N$  dimensions ( $N$  étant le nombre de caractéristiques) qui s'adapte aux données multidimensionnelles tout en considérant une marge. En classification, le même hyperplan est utilisé pour classer distinctement les points de données, en recherchant celui avec la marge maximale, c'est-à-dire la distance maximale entre les classes cibles. SVR est une variante de la Machine à Vecteurs de Support adaptée à la régression. Contrairement aux méthodes traditionnelles de régression, SVR vise à minimiser l'erreur tout en restant à l'intérieur d'une marge d'erreur  $\epsilon$ . Voici comment SVR est généralement formulé [89] :

$$f(x) = \langle w, x \rangle + b$$

- $w$  est le vecteur de poids.
- $b$  est le terme de biais.
- $\langle \cdot, \cdot \rangle$  représente le produit scalaire.

L'optimisation de SVR vise à trouver  $w$  et  $b$  de manière à minimiser à la fois l'erreur d'ajustement et la violation de la marge d'erreur  $\epsilon$ .

### 4.2.2 Vecteur d'entrée

Dans le cadre de notre algorithme d'analyse de durée de vie des échantillons, chaque échantillon est représenté par un vecteur structuré appelé vecteur d'entrée. Ce vecteur comprend plusieurs variables numériques qui capturent différentes caractéristiques des échantillons, notamment la capacité, la résistance, le facteur de dissipation avant et après le vieillissement.

Ces variables sont normalisées avant d'être utilisées pour entraîner deux modèles prédictifs : un modèle de régression Support Vector Régression (SVR) et un modèle XGBoost, afin d'assurer une comparaison entre les différents attributs des échantillons en ajustant les valeurs pour qu'elles se situent dans une plage commune et cohérente, entre 0 et 1. Cela favorise une analyse robuste de leur performance et de leur stabilité dans diverses conditions.

### 4.2.3 Technique de traitement des données

Le programme utilise `StandardScaler` pour standardiser les caractéristiques des données. Cette technique est essentielle pour mettre toutes les variables à la même échelle, ce qui améliore la performance et la convergence des algorithmes d'apprentissage automatique. `StandardScaler` réalise cette standardisation en soustrayant la moyenne et en divisant par l'écart-type pour chaque caractéristique, selon l'équation suivante :

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4.1)$$

où  $z$  est la valeur standardisée,  $x$  est la valeur originale,  $\mu$  est la moyenne de la caractéristique, et  $\sigma$  est l'écart-type de la caractéristique.

## Pourquoi le traitement des données est-il important ?

Le traitement des données est une étape cruciale dans le développement de tout modèle d'apprentissage automatique. Un traitement adéquat des données peut grandement influencer les performances du modèle. Voici quelques raisons pour lesquelles le traitement des données est important :

- **Qualité des Données** : Les données brutes peuvent contenir des valeurs manquantes, des valeurs aberrantes ou des incohérences qui peuvent fausser les résultats du modèle.

- **Échelle des Données** : Les algorithmes d'apprentissage automatique fonctionnent mieux lorsque les données sont sur une échelle similaire. La standardisation permet de mettre toutes les caractéristiques sur un pied d'égalité.
- **Performance du Modèle** : Des données bien traitées permettent aux algorithmes d'apprendre plus efficacement, ce qui se traduit par une meilleure performance en termes de précision, de rappel, de F1-score, etc.
- **Convergence des Algorithmes** : Les algorithmes comme la régression logistique et les réseaux neuronaux convergent plus rapidement et plus sûrement lorsque les données sont normalisées.

#### 4.2.4 Répartition des données entre les ensembles de formation et de test

Le tableau 4.1 résume la répartition des données entre les ensembles d'apprentissage (train) et de test (test), ainsi que le nombre total de données pour chaque classe.

TABLE 4.1 – Répartition des données entre les ensembles de formation et de test

Classe	Ensemble	Nombre de Données
Capacité	Train	24
Capacité	Test	6
Facteur_dissipation_avant	Train	24
Facteur_dissipation_avant	Test	6
Facteur_dissipation_après	Train	24
Facteur_dissipation_après	Test	6
R_avant	Train	24
R_avant	Test	6
R_après	Train	24
R_après	Test	6
Delta_C	Train	24
Delta_C	Test	6
Durée de vie	Train	24
Durée de vie	Test	6
<b>Total</b>	<b>Train</b>	<b>168</b>
<b>Total</b>	<b>Test</b>	<b>42</b>

Chaque classe (ou caractéristique) a été divisée en un ensemble de formation et un ensemble de test en suivant le ratio de 80% pour la formation et 20% pour le test, ce qui correspond à 24 données pour l'ensemble de formation et 6 données pour l'ensemble de test, pour chaque caractéristique et la cible 'durée de vie'. Cette répartition permet d'entraîner le modèle sur une quantité suffisante de données tout en conservant une portion distincte pour évaluer objectivement sa performance sur des données non vues lors de l'entraînement. Il est préférable pour les petites données d'utiliser une répartition de 80% pour l'entraînement et 20% pour le test, afin

de maximiser l'utilisation des données disponibles tout en assurant une évaluation fiable du modèle. L'histogramme figure 4.1 représente la distribution des valeurs de la durée de vie des éprouvettes dans notre dataset. Voici quelques points d'analyse :

- Plage des données : La durée de vie varie entre environ 12 et 22 unités.
- Fréquence : La fréquence de chaque intervalle de durée de vie est indiquée sur l'axe vertical (ordonnée).
- Distribution :
  - La majorité des échantillons ont une durée de vie autour de 16 à 18 unités, ce qui est indiqué par le pic le plus élevé de l'histogramme.
  - Il y a moins d'échantillons avec des durées de vie plus courtes (entre 12 et 14) et plus longues (entre 20 et 22).
- Forme de la distribution : La distribution semble légèrement asymétrique avec une concentration plus élevée vers le centre, mais il y a une distribution plus large de chaque côté.

En résumé, l'histogramme montre que la majorité des éprouvettes ont une durée de vie autour de 16 à 18 unités, avec une dispersion des valeurs de durée de vie entre 12 et 22 unités.

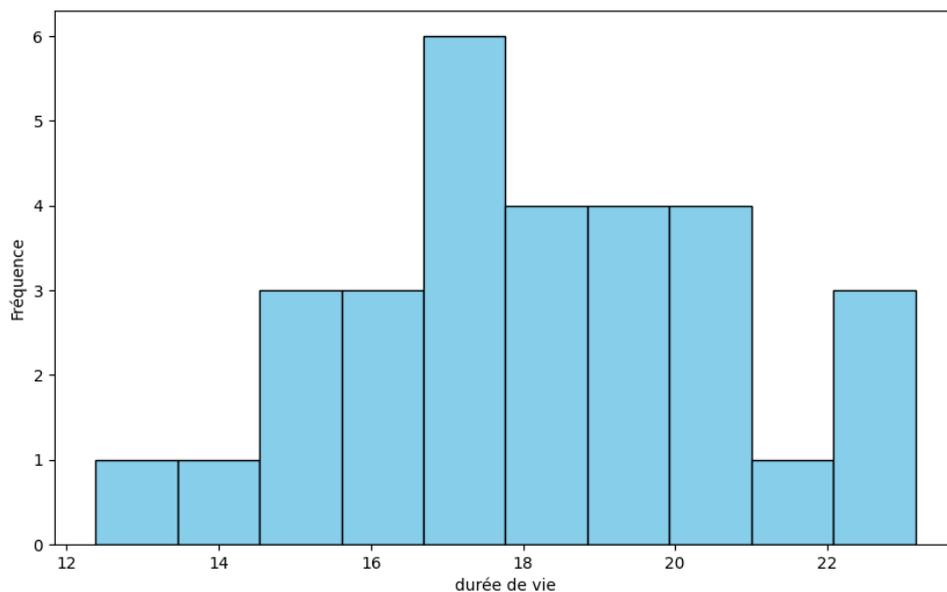


FIGURE 4.1 – Histogramme représentant la distribution des durées de vie des échantillons

### 4.2.5 Analyse de la Matrice de Corrélacion

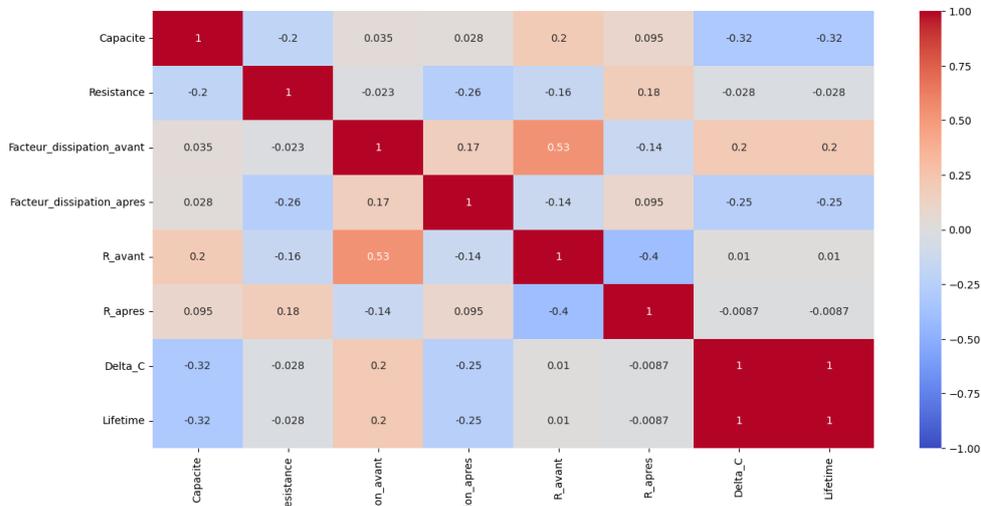


FIGURE 4.2 – Matrice de corrélation des variables

La matrice de corrélation (Figure 4.2) présentée montre les relations entre différentes variables des échantillons, en indiquant la force et la direction des corrélations linéaires entre chaque paire de variables.

— **Capacité :**

— La capacité présente une corrélation négative modérée avec la résistance (-0.2) et le delta de capacité (-0.32), ainsi qu'avec la durée de vie des échantillons (-0.32). Cela indique que des capacités plus élevées sont associées à des résistances, des variations de capacité et des durées de vie plus faibles.

— **Résistance :**

— La résistance est faiblement corrélée avec la plupart des autres variables. Elle présente une corrélation négative faible avec la capacité (-0.2) et une très faible corrélation avec la durée de vie (-0.028). Cela suggère que la résistance n'a pas un impact significatif sur les autres variables dans cet ensemble de données.

— **Facteur de dissipation avant et après :**

— Les deux mesures du facteur de dissipation avant et après sont faiblement corrélées entre elles (0.17). Le facteur de dissipation avant montre une corrélation positive modérée avec  $R_{\text{avant}}$  (0.53), suggérant que des facteurs de dissipation plus élevés avant l'essai sont associés à des résistances initiales plus élevées.

— **Résistances avant et après :**

— Les résistances mesurées avant et après montrent une corrélation négative notable avec  $R_{\text{avant}}$  et  $R_{\text{après}}$  (-0.4), indiquant que des résistances initiales plus élevées sont associées à des résistances finales plus faibles.

— **Delta\_C :**

- Le delta de capacité est négativement corrélé avec la capacité (-0.32), le facteur de dissipation après (-0.25), et la durée de vie (-0.25), suggérant que des variations plus importantes de capacité sont associées à des capacités et des durées de vie plus faibles.
- **Durée de vie :**
  - La durée de vie présente des corrélations similaires à celles observées pour la capacité et le delta de capacité, ce qui indique que des capacités plus faibles et des variations de capacité plus importantes sont associées à des durées de vie réduites des échantillons.

En résumé, les corrélations les plus significatives montrent que la capacité et la durée de vie des échantillons sont liées négativement avec la résistance et  $\Delta C$ . Cela peut indiquer qu'un maintien de la capacité et une minimisation des variations de capacité sont essentiels pour prolonger la durée de vie des échantillons. Les corrélations positives entre les facteurs de dissipation et certaines résistances montrent également des relations complexes qui peuvent nécessiter des analyses plus approfondies pour être pleinement comprises.

#### 4.2.6 Évaluation des performances

Les performances du modèle sont évaluées à l'aide de plusieurs métriques standard [90] :

- **Mean Absolute Error (MAE) :** Mesure la moyenne des écarts absolus entre les prédictions et les valeurs réelles.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

où  $y_i$  sont les valeurs réelles,  $\hat{y}_i$  sont les valeurs prédites par le modèle, et  $n$  est le nombre d'échantillons.

- **Mean Squared Error (MSE) :** Calcule la moyenne des carrés des écarts entre les prédictions et les valeurs réelles.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

où  $y_i$  sont les valeurs réelles,  $\hat{y}_i$  sont les valeurs prédites par le modèle, et  $n$  est le nombre d'échantillons.

- **Coefficient de détermination ( $R^2$ ) :** Indique la proportion de la variance dans la variable dépendante qui est prévisible à partir de la variable indépendante.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

où  $y_i$  sont les valeurs réelles,  $\hat{y}_i$  sont les valeurs prédites par le modèle,  $\bar{y}$  est la moyenne des valeurs réelles, et  $n$  est le nombre d'échantillons.

### 4.2.7 Analyse comparative des performances de modèle SVR

La figure 4.3 présente une comparaison entre les valeurs réelles et les valeurs prédites par le modèle de régression SVR (Support Vector Regression). Les points bleus sur le graphique représentent les valeurs prédites par le modèle, tandis que la ligne rouge en pointillé représente la ligne idéale où les valeurs prédites seraient exactement égales aux valeurs réelles. La proximité des points bleus à cette ligne rouge indique que les prédictions faites par le modèle SVR sont très proches des valeurs réelles, suggérant ainsi une haute précision du modèle. Les écarts minimes entre les points bleus et la ligne rouge montrent que les erreurs de prédiction du modèle sont faibles. La distribution des valeurs couvre une plage de valeurs réelles allant d'environ 12 à 22, avec des valeurs prédites par le modèle suivant une gamme similaire. Cela indique que le modèle SVR est bien calibré et capable de prédire avec précision dans cette plage de valeurs. En résumé, la figure démontre que le modèle SVR offre une performance satisfaisante avec des prédictions précises et des erreurs minimales, ce qui suggère que le modèle est bien adapté aux données et peut être utilisé pour des prédictions fiables dans ce contexte.

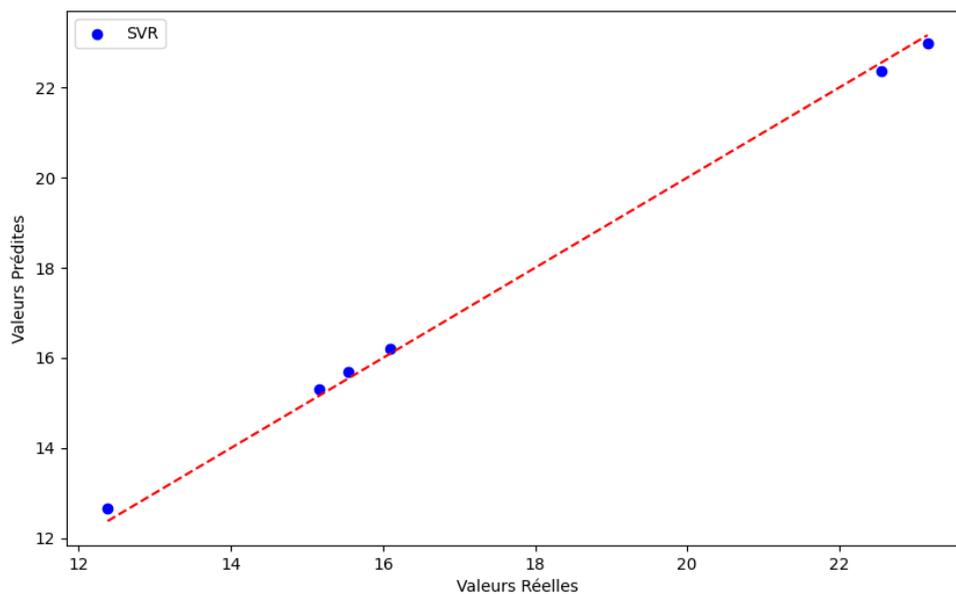


FIGURE 4.3 – Comparaison des Prédictions : SVR

### 4.2.8 Comparaison des performances entre SVR et XGBoost

la suite de ses résultats sont mesurés dans le tableau 4.2

TABLE 4.2 – Comparaison des performances entre SVR et XGBoost

Modèle	R-squared	Mean Squared Error (MSE)	Mean Absolute Error (MAE)
SVR	0,9986	0,0314	0,1694
XGBoost	0,8466	2,4289	1,0494

Avant d'examiner ces résultats, il est pertinent d'analyser les performances des modèles SVR et XGBoost en termes de R-squared, MSE et MAE. **R-squared (Coefficient de détermination) :**

- **SVR** : Le modèle SVR explique très bien la variance des données avec un R-squared de 99,86%, indiquant une excellente capacité à ajuster les données.
- **XGBoost** : Bien que moins élevé que SVR, XGBoost montre également une bonne capacité d'ajustement avec un R-squared de 84,66%.

**Mean Squared Error (MSE - Erreur quadratique moyenne) :**

- **SVR** : Le MSE de 0,0314 pour SVR indique des erreurs de prédiction relativement faibles en termes de dispersion des erreurs au carré.
- **XGBoost** : Avec un MSE de 2,4289, XGBoost présente une dispersion des erreurs au carré plus élevée par rapport à SVR.

**Mean Absolute Error (MAE - Erreur absolue moyenne) :**

- **SVR** : Le MAE de 0,1694 pour SVR montre que les prédictions sont en moyenne à 0,1694 unité de la vraie valeur.
- **XGBoost** : XGBoost a un MAE de 1,0494, indiquant des erreurs absolues moyennes légèrement plus élevées que SVR.

Le modèle SVR semble surpasser XGBoost en termes de R-squared, indiquant une meilleure capacité à ajuster les données. Cependant, XGBoost montre des performances acceptables avec des erreurs légèrement plus élevées (MSE et MAE) par rapport à SVR. Le choix entre les deux modèles dépendra des exigences spécifiques du problème, telles que la précision requise et la sensibilité aux erreurs de prédiction.

### 4.3 Distribution des Résidus

La figure 4.4 montre l'histogramme des résidus des prédictions du modèle SVR. Cet histogramme indique que les erreurs de prédiction sont généralement centrées autour de zéro, ce qui signifie que les prédictions du modèle ne sont ni systématiquement surestimées ni sous-estimées. La majorité des résidus se situent entre -0,2 et 0,1, bien que l'on observe un pic notable à environ 0,2. Cela suggère que pour certaines instances, les erreurs de prédiction sont plus importantes. Ainsi, le modèle SVR fournisse des prédictions globalement proches des valeurs réelles

[89].

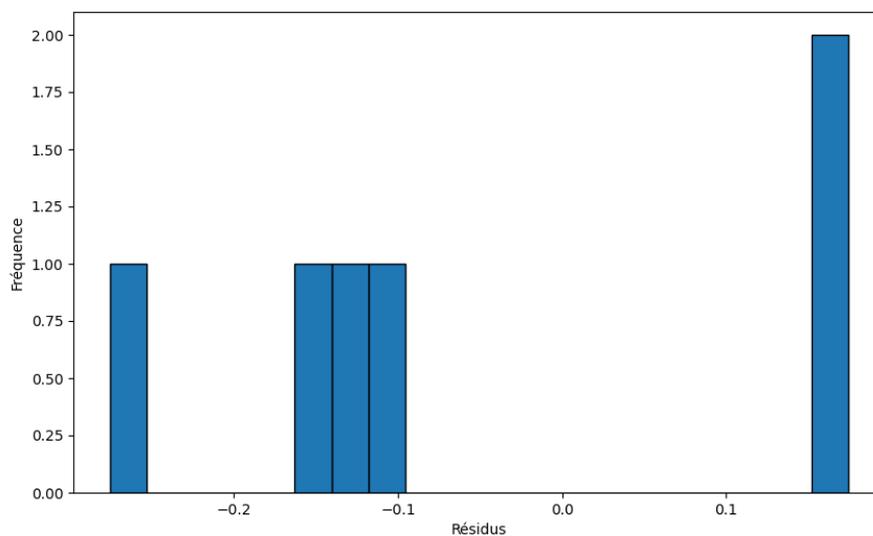


FIGURE 4.4 – Histogramme représentant la distribution des durées de vie des échantillons : SVR

La figure 4.5 illustrant l’histogramme des erreurs de prédiction pour le modèle XGBoost montre que la majorité des erreurs sont centrées autour de 0, ce qui indique que les prédictions du modèle sont globalement proches des valeurs réelles. La distribution des erreurs, allant de -3 à 2, montre que le modèle fait parfois des sous-estimations (erreurs négatives) et des surestimations (erreurs positives). La légère asymétrie avec un petit biais vers la droite suggère que les erreurs positives sont moins fréquentes mais existent. Cette concentration des erreurs autour de 0, avec quelques erreurs plus importantes, met en lumière que le modèle XGBoost est performant et précis, bien que certaines prédictions puissent être améliorées pour réduire les erreurs plus grandes.

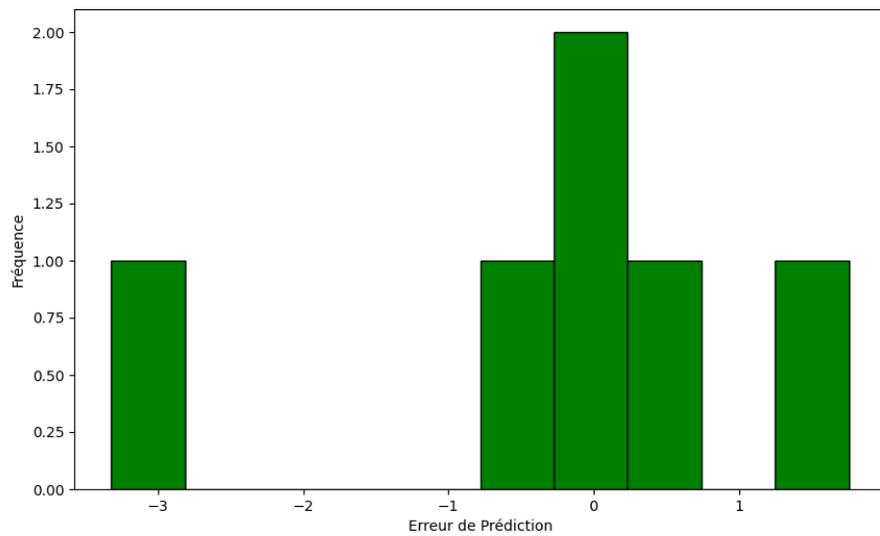


FIGURE 4.5 – Histogramme représentant la distribution des erreurs de prédiction des durées de vie des échantillons : XGBoost

## 4.4 Conclusion

XGBoost et Support Vector Regression (SVR) sont des piliers essentiels pour le développement de solutions avancées en intelligence artificielle et en apprentissage automatique. Leur intégration harmonieuse permet de traiter efficacement les données, de former des modèles prédictifs sophistiqués et de déployer des applications à grande échelle. À travers les analyses et évaluations des performances présentées, il est évident que chaque outil possède des atouts spécifiques qui répondent à divers besoins et contextes d'application.

Dans notre étude, l'utilisation du modèle SVR a démontré sa capacité à prédire la durée de vie de chaque éprouvette torsadée avec une précision améliorée, en exploitant les indicateurs disponibles. Comparativement à XGBoost, SVR s'est avéré être le choix optimal pour notre jeu de données spécifique, offrant des résultats robustes et fiables. Cette observation souligne l'importance critique de sélectionner le bon modèle en fonction des caractéristiques des données et des objectifs du projet.

## Conclusion générale

Notre étude s'est concentrée sur le vieillissement des systèmes d'isolation électrique à l'aide d'éprouvettes torsadées standard de fils émaillés en cuivre, de diamètres respectifs de 1,25 mm et 0,5 mm. En fait, 30 éprouvettes pour chaque diamètre ont été utilisées. Nous avons d'abord mesuré la tension d'apparition des décharges partielles (TADP) à fréquence industrielle. Ensuite, nous avons provoqué le vieillissement en appliquant une tension équivalant à 2 fois la TADP pour le diamètre de 1,25 mm et 2,5 fois la TADP pour le diamètre de 0,5 mm sur chaque éprouvette respective. Cette tension a été maintenue jusqu'à ce que l'éprouvette claque, ce qui définit le vieillissement électrique étudié. La durée jusqu'au claquage est ainsi considérée comme la durée de vie de l'éprouvette, avec les tensions correspondantes sont celles de claquage.

En outre, le vieillissement a été caractérisé par plusieurs paramètres, notamment la capacité, l'impédance la résistance et le facteur de dissipation diélectriques des systèmes d'isolation électrique. Avant et après le vieillissement, nous avons mesuré ces paramètres sur une large gamme de fréquences. Ces mesures ont permis d'établir une corrélation entre ces paramètres et la durée de vie des éprouvettes. Pour approfondir la compréhension des processus de dégradation et de déformation du système d'isolation électrique, une analyse microscopique a été réalisée. Cette analyse permet non seulement de visualiser les surfaces du système du système d'isolation électrique, mais aussi de mesurer son épaisseur.

Les résultats expérimentaux montrent que la TADP et la tension de claquage augmentent quand le diamètre des fils émaillés diminue. Cependant, l'augmentation de la tension de claquage induit une diminution de la durée de vie. Ainsi, cette dernière est donc plus importante pour le grand diamètre.

Deux éprouvettes de diamètres respectifs de 1,25 mm et de 0,5 mm ont a été sélectionnée de manière aléatoire. Avant vieillissement, et à mesure que la fréquence augmente, l'impédance, la résistance et le facteur de dissipation des fils émaillés diminuent, tandis que la capacité reste généralement stable. En revanche, lorsqu'on augmente le diamètre des fils émaillés, la capacité montre une légère augmentation, tandis que les autres paramètres (impédance, résistance, facteur de dissipation) diminuent légèrement. Après vieillissement, et pour un diamètre donné des fils émaillés, une augmentation de la fréquence entraîne une diminution de l'impédance et de la résistance, tandis que la capacité et le facteur de dissipation diélectrique restent stables. En augmentant le diamètre, nous avons observé une légère diminution de l'impédance, de la résistance et du facteur de dissipation diélectrique, tandis que la capacité augmente.

Sur trois éprouvettes (de 0,5 mm de diamètre), la capacité a été remesurée 1

heures après le claquage. Une diminution a été notée. Par ailleurs, l'augmentation du facteur de dissipation (D) après le vieillissement, lorsque la fréquence augmente, est liée à la diminution de capacité. De telles variations indiquent des modifications surfaciques et internes et des changements dans les propriétés diélectriques du système isolant. Ce qui justifie l'analyse microscopique effectuée dans cette étude.

Cette analyse a révélé une dégradation du matériau, principalement au niveau de la torsade, passant d'une surface lisse avant le vieillissement à une surface rugueuse après. Ce provoquerait d'éventuelles dilatation et contraction du matériau conducteur (cuivre) fragilisant ainsi les couches isolantes. Cette analyse a montré également qu'après vieillissement, l'isolant s'amincit après vieillissement. Les champs électriques élevés induisent des contraintes électromécaniques, provoquant des déformations permanentes, ce qui favorise la formation de microfissures. Les décharges partielles dans les zones vulnérables de l'isolant créent des voies de dégradation qui réduisent progressivement son épaisseur. De plus, les décharges corona produisent des ions et des radicaux libres qui attaquent chimiquement l'isolant, contribuant à son érosion.

L'analyse des corrélations n'a pas révélé de lien entre les indicateurs de vieillissement et la durée de vie des éprouvettes. En revanche, une forte corrélation a été observée entre le claquage et la capacité.

Pour compléter cette étude, nous avons réalisé une prédiction de la durée de vie en utilisant des techniques d'intelligence artificielle. Pour ce faire, nous avons employé les modèles Support Vector Regression (SVR) et XGBoost. Faisant partie du Support Vector Machine (SVM), SVR est un algorithme simple et efficace avec des coûts de calcul réduits. De plus, XGBoost, un algorithme de gradient boosting, est largement utilisé pour la régression et la classification. Le traitement des données a été fait en utilisant StandardScaler. Les résultats obtenus indiquent que le modèle SVR est particulièrement efficace pour ajuster les données réelles et effectuer des prédictions précises. SVR offre des performances satisfaisantes avec des prédictions précises et des erreurs minimales, soulignant son adaptation aux données et sa fiabilité pour les prédictions dans ce contexte spécifique. En comparaison, XGBoost présente des performances acceptables bien que légèrement moins précises, avec des erreurs légèrement supérieures à celles de SVR.

Pour les perspectives à venir, il serait enrichissant de diversifier l'étude des fils émaillés en explorant différentes caractéristiques comme les grades, les classes thermiques et les diamètres. Il deviendrait essentiel de bâtir une base de données solide à partir de campagnes d'essais de vieillissement sur des spécimens individuels, facilitant ainsi le développement de modèles de prédiction précis de la durée de vie. L'objectif ultime consisterait à étendre le modèle de prédiction pour son application à l'échelle d'un bobinage complet d'un moteur de traction électrique, ouvrant ainsi de nouvelles voies pour optimiser la durabilité et les performances des systèmes d'isolation électrique industriels.

# Bibliographie

- [1] Trovão Leonor Jorge P.PEREIRINHA G.Paulo et M.HUMBERTO. « Electric vehicles chargers characterization : Load demand and harmonic distortion ». In : *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation* (October 2011), p. 1-7.
- [2] Pillay FAIZ Ebrahimpour et PRAGASEN. « Influence of unbalanced voltage on the steady-state performance of a three-phase squirrel-cage induction motor ». In : *IEEE transactions on energy conversion* vol.19, no.4 (December 2004), p. 657-662.
- [3] D.Pepliński GNACIŃSKI P.Hallmann et M.JANKOWSKI. « The effects of voltage subharmonics on cage induction machine ». In : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 111 (2019), p. 125-131.
- [4] Vincenzo Giangrande Paolo Lusuardi Luca Cavallini Andrea Galea MADONNA et MICHAEL. « Impact of thermal overload on the insulation aging in short duty cycle motors for aerospace ». In : *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*. IEEE. 2018, p. 1-6.
- [5] Noureddine B.Ould Bedja MOKHNACHE Boubakeur et M. FELIACHI. « Application of Neural networks in the thermal ageing prediction of transformer oil ». In : *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37262)*. T. 3. IEEE. 2001, p. 1865-1868.
- [6] L MOKHNACHE, A BOUBAKEUR et N Nait SAID. « Comparison of different neural networks algorithms used in the diagnosis and thermal ageing prediction of transformer oil ». In : *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. T. 6. IEEE. 2002, 6-pp.
- [7] A.Said MOKHNACHE Boubakeur et N NAIT. « Application of neural networks paradigms in the diagnosis and thermal ageing prediction of transformer oil ». In : *Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids. ICDL 2002 (Cat. No. 02CH37319)*. IEEE. 2002, p. 258-261.
- [8] Paolo GIANGRANDE Vincenzo MADONNA Georgina COSMA Gaurang VAKIL Chris GERADA GULRUKH TURABEE Muhammad RAZA KHOWJA et Michael GALEA. « The Role of Neural Networks in Predicting the Thermal Life of Electrical Machines ». In : *IEEE Access* vol.8 (2020), p. 40283 -40297.
- [9] URL : <https://www.cbmconnect.com/electrical-insulation-failure-2/>.

- [10] J.SMITH et E.JOHNSON. « Importance of Preventive Maintenance and Insulation Quality for Electrical Machine Reliability ». In : *IEEE Transactions on Industry Applications* 25 (october 2019), p. 120-135.
- [11] F.LOUBEAU. « Analyse des phénomènes de vieillissement des matériaux d'isolation électrique de machines de traction électrique ». Thèse de doct. Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab), May 2017.
- [12] B. VASEGHI. « Contribution à l'étude des machines électriques en présence de défaut entre spires ». Thèse de doct. INPL-GREEN Université Henri Poincaré, Nancy, 2009.
- [13] I. Culbert G. C. STONE E. A. Boulter et H. DHIRANI. « Electrical Insulation for Rotating Machines - Design Evaluation, Aging, Testing and Repair ». In : *Wiley-IEEE Press* (2004).
- [14] D. THAILLY. « Etude du champ de dispersion des machines à courant alternatif : application au diagnostic ». Thèse de doct. Université d'Artois, Béthune, 2007.
- [15] W. T. THOMSON et M. FENGER. « Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults ». In : *IEEE Industry Applications Society Meeting, Chicago, USA* vol.7, no.4.9 (August 2001), p. 26.
- [16] T.THOMSON et M.FENGER. « Case Histories of Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives ». In : *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Wisconsin, USA* (June 2003), 1459-1465 vol.3.
- [17] T.Thomson D.DORRELL et S.ROACH. « Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors ». In : *IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 33* vol.33, no.1 (January/February 1997), p. 24-34.
- [18] W.LI et K. MECHEFSKE. « Detection of Induction Motor Faults : A Comparison of Stator Current, Vibration and Acoustic Methods ». In : *Journal of Vibration and Control, Volume 12* 24 (2006), p. 166.
- [19] I. Culbert G C. STONE E A. Boulter et H. DHIRAN. *Electrical insulation for rotating machines*. The Institute of Electrical et Electronics Engineers, 11 July 2014.
- [20] *Desolutions*. <http://www.desolutions.com>.
- [21] R.SHANKAR et S.DAVE. *Degradation and Diagnostics of Electrical Machines, Master's Thesis 2021*. 2021.
- [22] R.GUEDIA. « Modélisation et caractérisation thermique de machines électriques synchrone à aimants permanents ». Thèse de doct. INSA de Lyon, 2014.
- [23] E.Ferdjallah KHERKHACHI. « Diagnostic du système isolant des machines électriques par identification paramétrique dans un contexte de maintenance prédictive des turbines offshore ». Thèse de doct. École doctorale Sciences et technologies de l'information et mathématiques (Nantes), 2015.

- [24] B. VASEGHI. « Contrubition à l'étude des machines électriques en présence d'un défaut entre-spices ». Thèse de doct. L'Institut National Polytechnique de Lorraine, december 2009.
- [25] Fides GUIDE. *Reliability methodology for electronic systems*. Rapp. tech. FIDES group, 2004.
- [26] IEC 60034-18-42 (2008) : Rotating electrical machines - Part 18-42 : Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters.
- [27] L. A. ESCOBAR et W. Q. MEEKER. « A review of accelerated test models ». In : *Statistical Science* vol. 21.no 2 (2006), p. 552-577.
- [28] GUILLERMIN et CHRISTOPHE. « Vieillissement électrique et thermique d'un composite résine époxyde-silice : étude des charges d'espace et de la conduction ». In : (2004). Thèse de doctorat, Pascal Physique Grenoble.
- [29] G.LAVALL. « Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension ». Thèse de doct. l'Université Paul Sabatier (Toulouse III), 2004.
- [30] DISSADO. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. Circuits, Devices and Systems. IET Nanodielectrics, 1992.
- [31] K. Bhowmick S. GHOSH D. Khastgir et G. MUKUNDA. « Thermal degradation and ageing of segmented polyamides ». In : *Polym. Degrad. Stab, Palermo, Italy* vol.67 (March 2000), p. 427-436.
- [32] E. David R. SOLTANI et L. LAMARRE. « Impact of humidity on dielectric response of rotating machines insulation system ». In : *IEEE Trans. Dielectr. Electr* vol.17, no.5 (October 2010), p. 1479 -1488.
- [33] K. KIMURA. « Multistress aging of machine insulation systems ». In : *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia Beach, VA, USA* (October 1995), p. 205-210.
- [34] Pawel PIETRZAK. « Mise au point de méthodes d'essais et d'analyse permettant le test multi-contraintes, le suivi du vieillissement et/ou la modélisation de durée de vie du système d'isolation employé dans les moteurs électriques pour de futures automobiles hybrides, hybrides rechargeables et tout électriques ». Thèse de doct. GEETS - Génie Electrique Electronique, Télécommunications et Santé : du système au nanosystème, 2023.
- [35] A. ANTON. *Emaux isolants et fils émaillés*. Techniques de l'ingénieur, 2009.
- [36] Alain ANTON. *Emaux Isolants Fils Emailles*. Ed. Techniques Ingénieur, February 2009.
- [37] <https://www.elektrisola.com/fr/Products/Enamelled-Wire/Types>.
- [38] E.FURUKAWA. « How Thermal Classes are Derived - NEMA Magnet Wire Thermal Class Ratings and Corresponding Film Insulation Applications Explained ». In : (2022).

- [39] Frost Nancy Bruetsch CHAPMAN Michael et RUDOLF. « Insulation systems for rotating low-voltage machines ». In : *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, BC, Canada*. IEEE. 2008, p. 257-260.
- [40] Norme IEC 60034-18-1, « Machines électriques tournantes : Qualification et essais de type des systèmes d'isolation de type I utilisés dans des machines alimentées par convertisseurs de tension ». 2006.
- [41] IEC 85 : 1984, Evaluation et classification thermique de l'isolation électrique.
- [42] IEC 34-1 : 1996, Machines électriques tournantes Partie 1 : Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement.
- [43] C. MENGUY. « Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides ». In : *Techniques de l'ingénieur, Matériaux / Matériaux fonctionnels* (August 1997).
- [44] IEC 60085 (2007) : Electrical insulation - Thermal evaluation and designation.
- [45] A. BHUMIWAT. « Depolarization index for dielectric aging indicator of rotating machines ». In : *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* vol.2, no.6 (December 2015), p. 3126 -3132.
- [46] Liu Xuezhong Lei Pingzhen Wang Jingna Fan Jiexin Zhang YUAN Pengfei et XIAOQIANG. « Deterioration of stator winding insulation in inverter-fed traction motors ». In : *2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Knoxville, TN, USA*. IEEE. 2020, p. 457-460.
- [47] Peer Renner A.Gerling D. Endisch RICHNOW J.Stenzel et CHRISTIAN. « Influence of different impregnation methods and resins on thermal behavior and lifetime of electrical stators ». In : *2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, Germany*. IEEE. October 2014, p. 1-7.
- [48] F.Guastavino BRIANO L.Gallesi et F.TORELLO. « Variation over time of partial discharge inception voltage due to combined electrical and thermal stress on twisted pairs ». In : *2021 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. IEEE. 2021, p. 543-546.
- [49] Fetouhi Louiza Sabatou M.Pin S.Belijar SZCZEPANSKI Mateusz et GUILLAUME. « PD energy as a marker of low-voltage insulation aging ». In : *2021 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Denver, CO, USA*. IEEE. 2021, p. 377-380.
- [50] IEC 60034-27-4 Rotating electrical machines : Measurement of insulation resistance and polarization index of winding insulation of rotating electrical machines.
- [51] IEC 60034-27-3 Machines électriques tournantes : Mesure du facteur de dissipation diélectrique sur le système d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques tournantes.
- [52] Culbert I.Boulter Edward Dhirani STONE Greg et HUSSEIN. *Electrical insulation for rotating machines : design, evaluation, aging, testing, and repair*. T. 83. John Wiley & Sons, 2014.

- [53] Giangrande Paolo Galea MADONNA Vincenzo et MICHAEL. « Evaluation of strand-to-strand capacitance and dissipation factor in thermally aged enamelled coils for low-voltage electrical machines ». In : *IET Science, Measurement & Technology* 13.8 (2019), p. 1170-1177.
- [54] <https://aaai.org/>.
- [55] Yoshua Bengio IAN GOODFELLOW et Aaron COURVILLE. *Deep learning*. The MIT Press, november 2016, p. 800.
- [56] FAN et al. « A theoretical analysis of deep Q-learning ». In : *Learning for dynamics and control*. PMLR. 2020, p. 486-489.
- [57] Z. Ghahramani Richard E. Turner SHIXIANG T.Lillicrap et Sergey LEVINE. « QProp : SAMPLE-EFFICIENT POLICY GRADIENT WITH AN OFF-POLICY CRITIC ». In : 7 (April 2017), p. 1-13.
- [58] <https://knowhow.distrelec.com/fr/maintenance-reparation-et-exploitation/lapport-de-lintelligence-artificielle-a-la-maintenance-predictive/>.
- [59] URL : <https://maser-engineering.com/intelligence-artificielle-comment-elle-revolutionne-la-maintenance-predictive/>.
- [60] <https://datafuture.fr/post/fabrique-ton-premier-reseau-de-neurones/>.
- [61] Chen-Jung LI et ASOK. « Neural network representation of fatigue damage dynamics ». In : *Smart Materials and Structures, Seattle, Washington, USA* vol.4, no.2 (1995), p. 126.
- [62] Vincenzo Cosma Georgina Vakil Gaurang Gerada Chris Galea KHOWJA Madonna et MICHAEL. « Lifetime estimation of enameled wires under accelerated thermal aging using curve fitting methods ». In : *IEEE Access* vol.9 (January 2021), p. 18993-19003.
- [63] Nezu SHAO Yimin et KIKUO. « Prognosis of remaining bearing life using neural networks ». In : *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering* 214.3 (2000), p. 217-230.
- [64] Vachtsevanos WANG Peng et GEORGE. « Fault prognostics using dynamic wavelet neural networks ». In : *AI EDAM* 15.4 (2001), p. 349-365.
- [65] M. Liu R. GEBRAEEL N. Lawley et PARMESHWARAN. « Residual life predictions from vibration-based degradation signals : a neural network approach ». In : *IEEE Transactions on industrial electronics* 51 [3].3 (July 2004), p. 694-700.
- [66] Lifeng Xinglin C.Richard Lee HUANG Runqing et JAY. « Residual life predictions for ball bearings based on self-organizing map and back propagation neural network methods ». In : *Mechanical systems and signal processing* 21.1 (2007), p. 193-207.
- [67] Wang Peng Zhu Xi Huang Jialiang Liu Feng Fang Zhi Ahmed AKRAM Shakeel et HAROON. « Prediction of partial discharge inception voltage for electric vehicle motor insulation using deep learning ». In : *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (2023).

- [68] Swersky Kevin Wang Ziyu Adams De Freitas SHAHRIARI Bobak et NANDO. « Taking the human out of the loop : A review of Bayesian optimization ». In : *Proceedings of the IEEE* 104.1 (2015), p. 148-175.
- [69] AFNOR. "IEC 60317-13 : Juin 2010, Specifications for particular types of winding wires - Part 13 : Polyester or polyesterimide overcoated with polyamide-imide enamelled round copper wire, class 200".
- [70] "NF EN 60172 - Méthode d'essai pour la détermination de l'indice de température des fils de bobinage émaillés", ed, 1995.
- [71] IEC 60851-5.4 :2019, Winding wires – Test methods –Part 5 : Electrical properties.
- [72] Naoki HAYAKAWA, Hiroshi INANO et Hitoshi OKUBO. « Partial discharge inception characteristics by different measuring methods in magnet wire under surge voltage application ». In : *2007 Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. IEEE. 2007, p. 128-131.
- [73] C. KWAN. « Dielectric phenomena in solids ». In : *Edition, Elsevier Academic Press* (2004).
- [74] Andrea CAVALLINI, Davide FABIANI et Gian Carlo MONTANARI. « Power electronics and electrical insulation systems-part 2 : life modeling for insulation design ». In : *IEEE Electrical Insulation Magazine* 26.4 (2010), p. 33-39.
- [75] Serghei SAVIN. « Nouvel indicateur de vieillissement de l'isolation inter-spires des machines électriques utilisées en aéronautique ». Thèse de doct. Université d'Artois, June 2013.
- [76] IEC TS 61934 :2024, Electrical insulating materials and systems - Electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses.
- [77] Bruno MORTAIGNE. « Vieillissement des composites : Évolution des propriétés et modélisation ». In : *Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites AM5321* (2005).
- [78] MATEEN et ABDUL. « Some methodologies used for the synthesis of cuprous oxide : a review ». In : *J Pak Mater Soc* 2.1 (2008), p. 40-43.
- [79] Locatelli Marie-Laure DIAHAM Sombel, Thierry Malec LEBEY et DAVID. « Thermal imidization optimization of polyimide thin films using Fourier transform infrared spectroscopy and electrical measurements ». In : *Thin solid films* 519.6 (2011), p. 1851-1856.
- [80] G. Pereira Dos Santos Lima ; S. Ait-Amar ; G. VELU et P. FREZEL. « Study of new ecological magnet wires performances during thermal aging tests ». In : *2022 IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD), Palermo, Italy, August 2022* (August 2022), p. 3-4.
- [81] Kavanagh McCulloch M. Burnham Howey SUMISLAWSKA M. Gyftakis et DA. « The impact of thermal degradation on electrical machine winding insulation ». In : *2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. IEEE. 2015, p. 232-238.

- [82] Daniel Corton R.Brudny WERYNSKI P.Roger et Jean F. « Proposition of a new method for in-service monitoring of the aging of stator winding insulation in AC motors ». In : *IEEE Transactions on Energy Conversion* 21.3 (2006), p. 673-681.
- [83] Loucif BENMAMAS. « Méthodes d'évaluation du risque de décharges partielles dans le bobinage de machines électriques destinées à la traction automobile ». Thèse de doct. de l'Université Paris-Saclay, november 2017.
- [84] Frédéric PERISSE, Piotr WERYNSKI et Daniel ROGER. « A new method for AC machine turn insulation diagnostic based on high frequency resonances ». In : *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 14.5 (2007), p. 1308-1315.
- [85] R.Roger-D.Brudny WERYNSKI P.Corton et JF. « On-line monitoring of insulation aging in AC motors fed by PWM inverters ». In : *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.* (2005), p. 1942-1948.
- [86] Roger-Daniel Perisse Frédéric Brudny-Jean-François Schlupp WERYNSKI Piotr et PIERRE. « Vieillissement des diélectriques et surveillance in situ des machines électriques ». In : *SEE Revue de l'électricité et de l'électronique, REE* 11 (2006), p. 37-48.
- [87] <https://www.python.org/doc/essays/blurb/>.
- [88] Tianqi CHEN et Carlos GUESTRIN. « Xgboost : A scalable tree boosting system ». In : *Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining.* 2016, p. 785-794.
- [89] Pal-Srimanta Patranabis Dipak Chandra BASAK Debasish et al. « Support vector regression ». In : *Neural Information Processing-Letters and Reviews* 11.10 (2007), p. 203-224.
- [90] <https://kobia.fr/regression-metrics-quelle-metrique-choisir/>.