



**HAL**  
open science

# Analyse des effets des décharges partielles dans un câble de puissance pour usage aéronautique

Vladimir Pineda, Michael J Kirkpatrick, Philippe Molinié, E. Odic

► **To cite this version:**

Vladimir Pineda, Michael J Kirkpatrick, Philippe Molinié, E. Odic. Analyse des effets des décharges partielles dans un câble de puissance pour usage aéronautique. 12ème conférence de la Société Française d'Electrostatique, Société Française d'Electrostatique, Jul 2023, Cherbourg en Cotentin, France. hal-04424692

**HAL Id: hal-04424692**

**<https://cnrs.hal.science/hal-04424692>**

Submitted on 29 Jan 2024

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

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

# Analyse des effets des décharges partielles dans un câble de puissance pour usage aéronautique

V.R. Pineda Bonilla<sup>1,2</sup>, M. J. Kirkpatrick<sup>2</sup>, Ph. Molinié<sup>2</sup>, E. Odic<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Airbus Helicopters,  
International Airport Marseille Provence,  
13725 Marignane, France

<sup>2</sup> Laboratoire de Génie Electrique et Electronique  
de Paris (GeePs),  
Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS,  
91192, Gif-sur-Yvette, France

*Vladimir RICARDO PINEDA BONILLA est membre du personnel AIRBUS HELICOPTERS dans le cadre d'une convention industrielle CIFRE et est affilié à L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY en tant que doctorant, dans le cadre d'un accord de collaboration entre AIRBUS HELICOPTERS, CENTRALESUPELEC et SORBONNE UNIVERSITE.*

**Abstract**— L'objectif de cette étude est d'examiner le comportement du système d'isolation électrique d'un câble de puissance en présence de décharges partielles (DP). Le câble est du type rubané DH gauge 2 avec PTFE comme isolant, actuellement utilisé dans les avions. Pour ce faire, une enceinte de vieillissement sous DP a été conçue et réalisée. Ce dispositif permet de contenir une section de câble munie d'une tresse de blindage enserrant le câble et ainsi, en appliquant une tension au conducteur du câble, d'imposer à son système d'isolation une différence de potentiel suffisamment élevée pour produire des DP. Un vieillissement accéléré combiné est alors réalisé à température ambiante et pression atmosphérique en alimentant le câble sous haute tension alternative moyenne fréquence (~30 kHz). La géométrie de la tresse de blindage et l'amplitude de tension imposée permettent de sélectionner les DP internes et les DP externes au sein du système. Dans ce dernier cas, et afin d'évacuer les produits de décharge dans l'air, un flux d'air est imposé au travers de l'enceinte étanche. Le temps de retard au claquage, la puissance moyenne dissipée dans la décharge et la tension-seuil d'amorçage de décharges partielles sont alors mesurés dans ces conditions.

**Keywords**—Décharges partielles, câble de puissance, système d'isolation, aéronautique, vieillissement

## I. INTRODUCTION

L'électrification croissante des avions impose une élévation de tension du réseau de bord pour permettre une augmentation de puissance électrique embarquée tout en évitant d'augmenter la masse des conducteurs. Cette élévation de tension devient une contrainte importante pour les systèmes électriques embarqués, notamment pour les systèmes d'isolation électrique qui ne sont pas dimensionnés pour les « hautes tensions ». Ainsi, le risque d'amorçage de décharges partielles (DP) augmente, ce qui à moyen ou long terme peut conduire à un vieillissement accéléré des systèmes d'isolation solides et finir par causer une défaillance (claquage diélectrique).

Dans ce contexte, le câble de puissance est un composant qu'il convient de caractériser vis-à-vis de ces nouvelles contraintes de tension dans des conditions environnementales variées et

parfois sévères [1]. Des travaux antérieurs [2] ont mis en évidence l'effet d'un vieillissement thermique accéléré (plusieurs mois à 240°C) sur la tension-seuil d'apparition de décharge partielle (PDIV). De plus, une différenciation est établie entre DP internes (décharges amorcées dans les cavités internes de l'isolant au niveau des brins périphériques du conducteur) et DP externes (décharges amorcées au niveau des conducteurs de la tresse de masse en contact de la face isolante externe du câble) [2]. Ainsi, une chute de 25% de la tension-seuil d'amorçage des décharges (PDIV) internes a été observée après un vieillissement thermique prolongé (9072 heures) [2]. Toutefois, l'incidence du type de décharge n'a pas été investigué en profondeur vis-à-vis des défaillances [3]. En effet, les décharges internes et externes apparaissant pour des tensions et localisations différentes dans les

---

Auteur correspondant : Vladimir Pineda  
Mail: vladimir.ricardo-pineda-bonilla@airbus.com

câbles, leur action doivent aussi faire l'objet d'analyses spécifiques [2].

Il est bien connu que la présence de décharges partielles dans un système d'isolation solide peut avoir des effets néfastes dans des temps très courts par rapport à la durée d'exploitation du composant [4]. Cependant, la dynamique et la gravité de ces effets peut varier fortement d'un système à l'autre. Des études spécifiques doivent alors être menées [5].

Pour toutes ces raisons, une campagne d'essais en haute tension et haute fréquence consacrée à la mesure des effets des décharges partielles dans les câbles a été conduite. Une attention particulière a été portée à l'évolution de la PDIV au cours du vieillissement ainsi qu'à l'identification du type de décharge partielle.

## II. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

### A. Dispositif d'essai

Une enceinte de vieillissement sous décharges partielles a été conçue et réalisée pour cette étude. La fonction de cette enceinte est de contenir les échantillons de câble dont l'isolant solide est soumis aux décharges partielles. Dans ce but, l'enceinte est munie d'une traversée haute tension et d'une connexion de masse qui permettent d'imposer un champ électrique au système d'isolation du câble. L'enceinte est balayée par un flux constant (1 L/min) d'air (HR < 5% Vol.) visant à éviter l'accumulation de l'ozone produit par les décharges électriques [6].

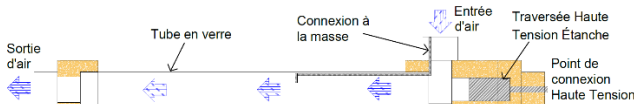


Figure 1 Schéma de l'enceinte.

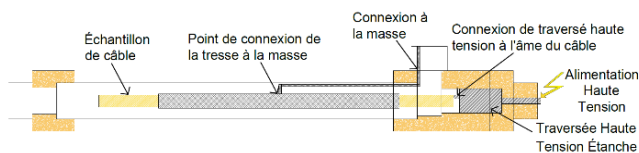


Figure 2 Schéma et cliché de l'enceinte contenant un échantillon de câble.

### B. Échantillons de câble

Le câble de puissance « DH » gauge 2, actuellement utilisé dans les avions, a été choisi comme objet d'étude. Il présente les caractéristiques suivantes :

Tableau 1 Dimensions et caractéristiques du câble « DH » gauge 2 [7]

<b>Diamètre externe</b>	10,16 mm
<b>Diamètre du conducteur</b>	8,3 mm
<b>Construction et matériau du conducteur</b>	Multibrin en cuivre plaqué nickel

Un échantillon correspond à une section de câble de 30 cm. À une des extrémités conductrices est adapté un connecteur. L'échantillon de câble est partiellement recouvert par une tresse métallique sur une longueur de 20 cm. En effet, les câbles de puissance dans un avion sont souvent munis d'une tresse pour les protéger mécaniquement. La tresse est étirée le plus possible pour diminuer au maximum l'espace d'air avec l'isolant du câble, puis fixée. Les extrémités de la tresse sont rétractées, et la jonction avec l'air et l'isolant est recouverte de graisse de silicone isolante pour éviter les décharges de surface dans cette région (Figure 3).

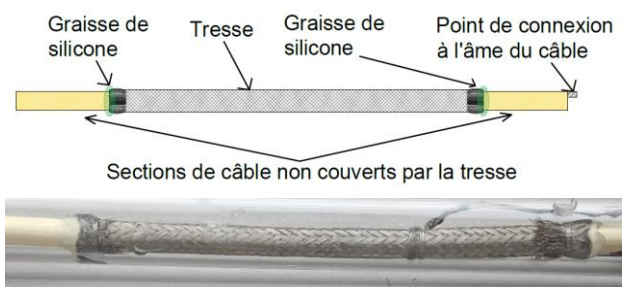


Figure 3 Schéma et cliché d'un échantillon avec tresse. À noter les extrémités de tresse rétractées et recouvertes de graisse isolante.

### C. Mesures préliminaires

Dans un premier temps, les PDIV externe et interne ont été mesurées à 50 Hz au moyen d'un dispositif analyseur de décharges partielles (Omicron MPD-600). Les valeurs retenues correspondent à une moyenne des valeurs obtenues au cours de 9 expériences successives.

La PDIV externe est mesurée en utilisant comme contre-électrode la tresse avec le traitement de ses extrémités décrit dans la section précédente. Pour les mesures de PDIV internes, la procédure repose sur l'élimination des décharges externes par 2 méthodes différentes (Figure 4) : (i) par immersion du câble (partie sous tresse) dans de l'huile isolante (comme déjà pratiqué dans d'autres travaux [3] [2]), (ii) par remplacement de la tresse par une feuille de cuivre collée à la surface du câble (les extrémités de l'électrodes de cuivre étant protégées par de la graisse de silicone, évitant ainsi les décharges de surface). Les résultats obtenus sont présentés en Figure 7.

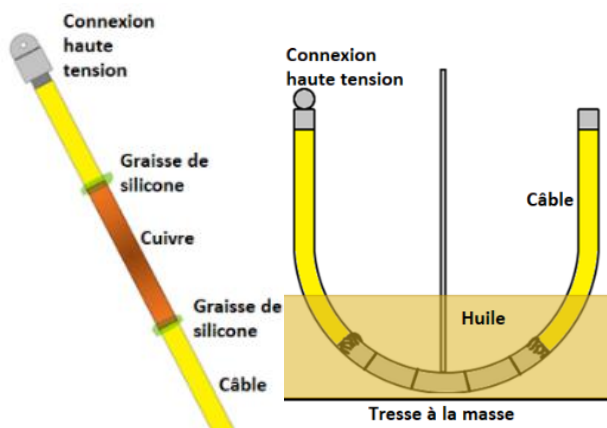


Figure 4 Méthodes de mesure de PDIV interne : À gauche - mesure avec contre-électrode en cuivre. À droite - mesure avec de l'huile diélectrique.

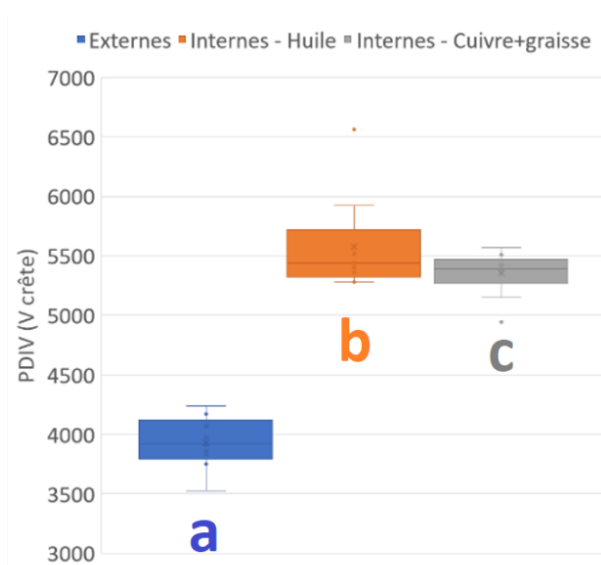


Figure 5 PDIV à 1000 mbar d'un même câble : a) DP externes (bleu) b) DP internes - tresse immergée dans l'huile isolante (orange) et c) DP internes - feuille de cuivre protégée avec de la graisse de silicone (gris). Chaque boîte est construite avec 9 mesures.

On obtient des valeurs de PDIV voisines lorsque mesurées avec immersion de la tresse dans l'huile isolante et mesurées avec le cuivre et la graisse, indiquant ainsi que cette contre-électrode a bien éliminé les décharges externes. De plus, on vérifie aussi que les décharges externes apparaissent à des tensions bien plus faibles que les décharges internes (ce qui est conforme à des résultats antérieurs [2]).

#### D. Procédure expérimentale

Deux types d'essais ont été conduits : temps de retard à la défaillance et évolution de la PDIV au cours du vieillissement. Pour les vieillissements sous décharges partielles, une tension sinusoïdale de fréquence 30 kHz a été appliquée à l'âme du câble. Cette tension était mesurée au niveau de la traversée haute tension de l'enceinte à l'aide d'une sonde Tektronix P6015 A (rapport 1:1000, 75 MHz de bande passante). Le courant a été mesuré au niveau du conducteur de mise à la terre de la tresse de masse à l'aide d'une sonde Tektronix CT2 (rapport 1 mV/mA, 1,2 kHz-200 MHz de bande passante). Par une méthode de produit instantané courant  $\times$  tension, la puissance moyenne dissipée dans la décharge a été calculée à l'aide d'un oscilloscope numérique (Tektronix MSO54, 500 MHz, 6,25 GS/s). Pour mesurer la PDIV, 5 mesures successives sont réalisées à l'aide un dispositif analyseur de décharges partielles.

**Temps de retard à la défaillance :** la tension (d'amplitude et fréquence fixées) est appliquée à l'âme du câble jusqu'à la défaillance du système d'isolation (rupture du système d'isolation solide). Le temps séparant l'instant d'application de la tension de l'instant de la défaillance est mesuré. Pour chaque niveau de tension, 7 échantillons sont testés.

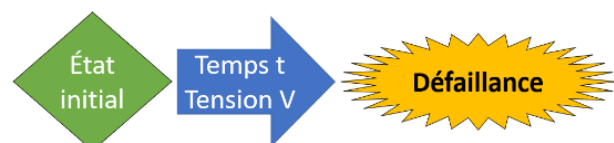


Figure 6 Essai de temps de retard à la défaillance

**Évolution de la PDIV :** la PDIV d'un échantillon neuf est mesurée. La tension est alors appliquée à l'âme du câble pendant une certaine durée à l'issue de laquelle le vieillissement est

interrompu. La PDIV est alors à nouveau mesurée. Puis, le vieillissement est repris dans les mêmes conditions et pour la même durée. Les phases de vieillissement et de mesure de PDIV sont enchaînées jusqu'à la défaillance du système.

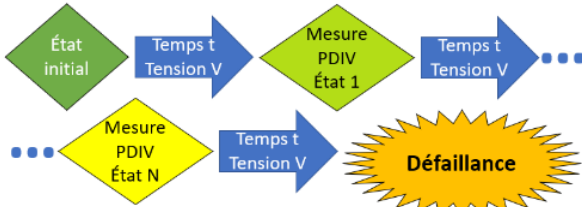


Figure 7 Essai d'évolution de la PDIV.

### III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### A. Temps de retard à la défaillance

Pour les essais de temps de retard à la défaillance, les tensions indiquées dans le Tableau 2 ont été utilisées. Pour chaque niveau de tension, 7 échantillons ont été testés.

Tableau 2 Tensions utilisées pour les mesures de temps de retard à la défaillance. Pour tous les essais, la fréquence de la tension appliquée est de 30 kHz.

Tension (V crête)	% de la PDIV externe initiale	% de la PDIV interne initiale
5000	130%	90%
5250	136%	95%
5500	143%	100%
5750	150%	105%
6500	170%	120%

Dans tous les cas, les échantillons sont soumis à des décharges externes, et pour les tensions les plus élevées (au-delà de 5,5 kV) à des décharges internes également.

Les valeurs moyennes de temps de retard à la défaillance mesurées sont données en Figure 8. Comme attendu, ces durées diminuent avec une augmentation de la tension. On notera que la dispersion des durées mesurées chute également de façon conséquente avec la tension. Un modèle de puissance inverse est appliqué avec une correspondance raisonnable. Le choix de ce modèle vient du fait qu'il est souvent utilisé pour modéliser le vieillissement de composants sous contraintes électriques [8].

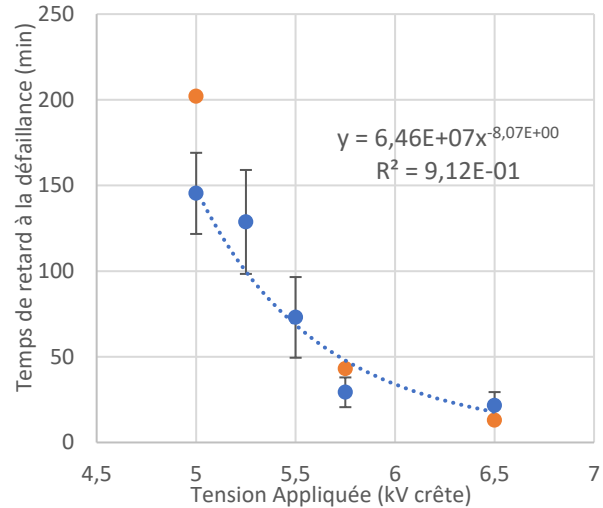


Figure 8 Temps moyens de retard à la défaillance en fonction de la valeur crête de tension appliquée (fréquence de 30 kHz) (bleu). Mesures obtenues sur 7 échantillons de câble ; barres d'erreur correspondant à l'écart-type. En orange, temps de retard à la défaillance de trois essais avec interruptions pendant les vieillissements.

La puissance moyenne dissipée par les décharges partielles croît quasi-linéairement avec l'amplitude de la tension appliquée comme illustré en Figure 9. On observe, pour une amplitude de tension appliquée donnée, une certaine dispersion des valeurs selon les échantillons ; toutefois ces valeurs évoluent peu jusqu'à la rupture de l'isolant.

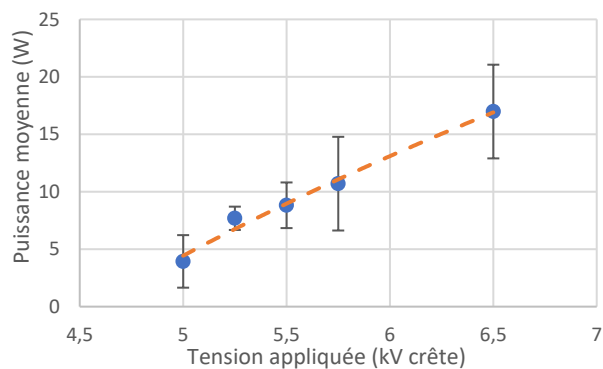


Figure 9 Puissance moyenne dissipée dans les décharges en fonction de la valeur crête de tension appliquée (fréquence de 30 kHz). Mesures obtenues sur 7 échantillons de câble ; barres d'erreur correspondant à l'écart-type.

#### B. Évolution de la PDIV

Les mesures de PDIV ont été réalisées en interrompant le vieillissement sous décharges (pour les valeurs de tension indiquées dans le Tableau 3). Il s'agissait donc de vieillissements fractionnés pour lesquels les durées ont été

choisies de telle sorte qu'au moins un état intermédiaire puisse être caractérisé par sa valeur de PDIV. Il convient tout d'abord de noter que le fait d'interrompre un vieillissement pour effectuer des mesures de PDIV (la durée d'interruption moyenne était typiquement comprise entre 12 heures et 18 heures) n'affectait pas significativement le temps de retard au claquage comme en témoignent les points expérimentaux (en orange) reportés en Figure 8, traduisant ainsi le fait que le vieillissement produit une dégradation irréversible au niveau de l'isolant solide.

Tableau 3 Tensions utilisées pour les essais d'évolution de la PDIV. Pour tous les essais, la fréquence de la tension appliquée est de 30 kHz.

Tension (V crête)	% de la PDIV externe	% de la PDIV interne
5000	130%	90%
5750	150%	105%
6500	170%	120%

#### 5000 V crête :

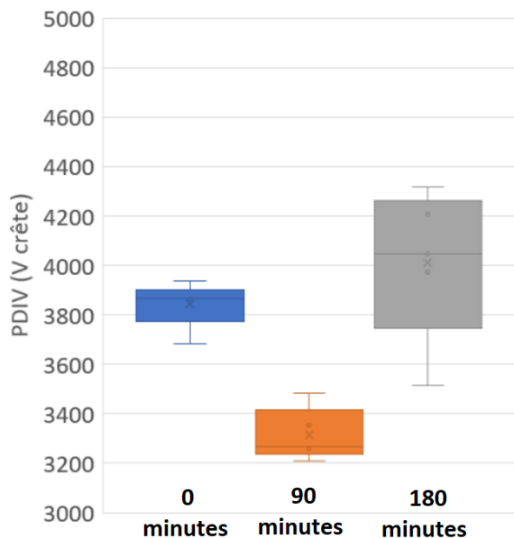


Figure 10 Évolution de la PDIV pendant le traitement avec 5000 V crête. Chaque boîte est construite avec 5 mesures successives.

Deux états intermédiaires ont été mesurés avec des vieillissements fractionnés de 90 minutes et un temps de retard au claquage cumulé de 202 minutes. La PDIV a chuté de 600 V pour le premier état intermédiaire et est revenue à des valeurs très proches à l'état initial pour le second état intermédiaire.

#### 5750 V crête :

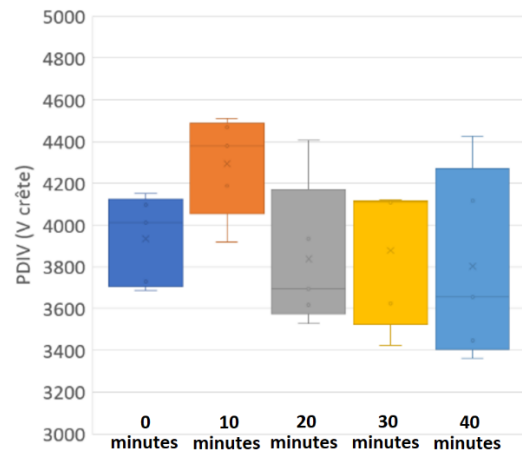


Figure 11 Évolution de la PDIV pendant le traitement avec 5750 V crête. Chaque boîte est construite avec 5 mesures successives.

Quatre états intermédiaires ont été mesurés avec des vieillissements fractionnés de 10 minutes et un temps de retard au claquage cumulé de 43 minutes. La PDIV a augmenté légèrement pour le premier état intermédiaire et est revenue à des valeurs très proches de l'état initial dans les autres états.

#### 6500 V crête :

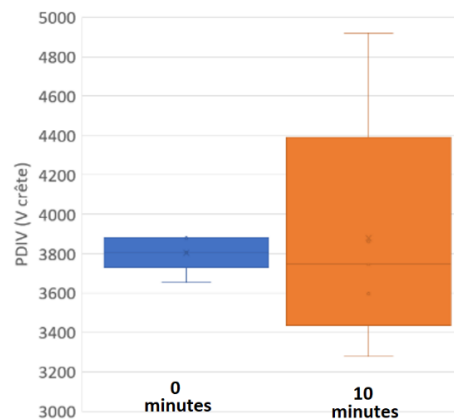


Figure 12 Évolution de la PDIV pendant le traitement avec 6500 V crête. Chaque boîte est construite avec 5 mesures successives.

Un état intermédiaire a été mesuré 10 minutes après l'état initial et le temps de retard au claquage cumulé a été de 13 minutes. La moyenne de PDIV a peu évolué entre l'état intermédiaire et l'état initial (mais avec une plus forte dispersion des valeurs).

Finalement, un essai de vieillissement sous décharges partielles internes uniquement été réalisé. Après 450 minutes de traitement à 6500

V crête, aucune évolution de la PDIV interne n'a été observée et il n'y a pas eu une défaillance du système.

#### IV. CONCLUSIONS

L'ensemble des essais réalisés visaient à aborder, sous un angle macroscopique, l'effet de la présence de décharges partielles au niveau d'un composant (câble) du réseau de puissance. L'amplitude et le profil de tension ont été choisis de telle sorte que d'une part ces effets puissent être observés sur un temps raisonnable, et d'autre part que la situation d'une charge alimentée par un convertisseur de puissance à commande MLI soit ici prise en compte. Cependant, il convient de remarquer que les vieillissements sous décharge n'ont été effectués qu'à pression atmosphérique, et que le câble sous test n'a pas été conçu pour être exploité dans les conditions de tension ici mises en œuvre.

Les décharges partielles internes et externes au niveau du câble ont été considérées. Une première constatation importante est que les décharges internes ont un faible effet sur les câbles par rapport aux décharges externes. Le vieillissement sous décharges internes uniquement n'a produit aucun effet observable (sur l'échelle de temps considérée) sur les câbles, ni en termes d'évolution de la PDIV, ni en termes de défaillance prématurée. Par ailleurs, la puissance moyenne dissipée pendant les vieillissements augmente de façon quasi-linéaire avec la tension, indépendamment de la présence ou non de décharges internes. Aussi, le modèle obtenu est satisfaisant pour toute la gamme de tension examinée, suggérant que le mécanisme de vieillissement accéléré et de défaillance est principalement attribuable aux décharges externes.

Un autre résultat notable est que les échantillons dont les traitements ont été interrompus pour mesurer la PDIV ont montré des temps de retard à la défaillance similaires à ceux obtenus lors de ininterrompus. Cette observation, et le fait que le dernier temps de traitement a été toujours très court par rapport au temps totale à la défaillance, montrent que les effets des traitements avec décharges partielles sont irréversibles.

Enfin, la PDIV ne semble pas varier significativement au cours des vieillissements sous décharges partielles. Même quelques minutes avant la défaillance, la valeur de PDIV demeure stable. Ainsi, la dégradation progressive du système d'isolation solide ne semble pas modifier, sur les échelles de temps examinées, les caractéristiques géométriques et diélectriques du système d'isolation solide accessibles par la seule mesure de la PDIV. Des travaux sont engagés pour approfondir ces questions.

#### Références

- [1] G. Lopez, «High-Performance Polymers for Aeronautic Wires Insulation: Current uses and Future Prospects,» *Recent progress in Materials*, vol. 3, n° 11, 2021.
- [2] M. Karadjian, «Endurance et tenue diélectrique de l'isolation de câbles électriques pour l'aéronautique,» Thèse de doctorat, 2018.
- [3] M. Karadjian, N. Imbert, C. Munier, M. Kirkpatrick et E. Odic, «Partial discharge detection in an aeronautical power cable,» 2018.
- [4] G. C. Montanari, P. Seri, S. F. Bononi et M. Albertini, «Partial Discharge Behavior and Accelerated Aging Upon Repetitive DC Cable Energization and Voltage Supply Polarity Inversion,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, n° 12, pp. 578 - 586, 2021.
- [5] J. Rivenc, S. Pin, C. V. d. Steen, F. Forget, E. Fond, G. Bélijar et G. Peres, «Analysis of standard parts aging under partial discharges for airborne applications,» chez *2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, Anaheim, California, USA, 2022.
- [6] P. Yao, H. Zheng, X. S. Yao et Z. Ding, «A method of monitoring partial discharge in switchgear based on ozone concentration,» *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, n° 11, pp. 654 - 660, 2019.
- [7] Airbus, *Enterprise Corporate Standard ECS0844 - High flexible nickel plated Power Cable*, 2017.
- [8] C. Dang, J.-L. Parpal et J.-P. Crine, «Electrical Aging of Extruded Dielectric Cables Review of Existing Theories and Data,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 3, n° 12, pp. 237 - 247, 1996.