

Influence de la géométrie des électrodes sur la tension d'apparition des décharges partielles PDIV et de claquage à la surface d'un isolant diélectrique

Julien THOUIN ¹, Pilar PUYUELO-VALDES ¹

¹ IRT Saint-Exupéry, French Institute of Technology, Toulouse, France

RESUME - L'étude des décharges de surface en conditions aéronautiques est particulièrement importante pour assurer la sécurité des avions qui utilisent de plus en plus de puissance électrique. Cette augmentation de la puissance embarquée s'accompagne naturellement d'une montée en tension et une attention particulière doit être accordée à l'isolation électrique. Dans ce contexte, et compte tenu des conditions particulièrement sévères auxquelles sont soumis les systèmes aéronautiques, il apparaît nécessaire de mener des études spécifiques sur l'apparition des défauts d'isolation en surface. La présente étude vise à analyser, à travers des mesures expérimentales et un modèle numérique, l'influence de la géométrie du système de mesure sur les résultats obtenus, dans le but d'en améliorer la répétabilité — un enjeu majeur pour ce type de caractérisation.

Mots-clés—Décharges surfaciques, PDIV, décharges partielles.

1. INTRODUCTION

Les conditions auxquelles sont exposés les systèmes électriques embarqués dans les avions sont particulièrement rudes (pression, pollution, condensation). Une attention particulière doit être accordée à l'isolation électrique. C'est pourquoi les standards utilisés jusqu'ici pour les systèmes terrestres, IEC 60664-1 [1], IEC 60112 [2] et MIL-HDBK-454B [3] sont aujourd'hui remis en question par certains auteurs [4] pour leur utilisation dans des conditions aéronautiques. De nombreuses études, parfois anciennes, ont été menées sur des systèmes terrestres [5][6][7][8]. Les études prenant en compte les conditions aéronautiques et notamment les effets de la faible pression atmosphérique en altitude sont, quant à elles, moins nombreuses et bien plus récentes [4][9].

La mesure des seuils d'apparition des défauts d'isolation électrique en surface est une mesure particulièrement exigeante, notamment sur sa répétabilité.

L'objectif est, via l'étude de différentes configurations d'électrodes, de mettre en évidence un effet de la surface de l'isolant diélectrique propre et sec sur l'apparition des défauts d'isolement électrique. Cette étude s'appuie également sur un modèle numérique : AIRLIFTv3, un outil basé sur la théorie de Townsend qui permet de calculer le PDIV.

Dans un premier temps, nous décrirons le dispositif expérimental, la géométrie des électrodes utilisées ainsi que les différentes configurations testées. Ensuite, nous présenterons et analyserons les résultats des mesures relatives aux seuils d'apparition des phénomènes de défaut d'isolement électrique.

Nous exposerons les résultats des simulations numériques et enfin nous les comparerons aux données expérimentales.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

2.1. Alimentation et système de mesure

Pour alimenter ces électrodes on utilise un amplificateur haute tension TREK 10/40 A-HS couplé à un générateur de fonction. Cet amplificateur est capable de délivrer un courant maximal de 40 mA et une tension maximale de 10kV. Dans le cadre de cette étude nous avons volontairement limité le courant de sortie à quelques milliampères afin de limiter l'endommagement des échantillons de PEEK lors du claquage en surface. La tension est mesurée à l'aide d'une sonde de tension différentielle 7kV. Pour la détection des décharges partielles on utilise une sonde non intrusive qui vient pincer le câble de terre et agit comme une antenne, ce capteur a déjà été utilisé notamment dans [10].

2.2. Configurations des électrodes

Les électrodes utilisées sont des demi-cylindres aux bords arrondis en inox et sont présentées sur la figure suivante :

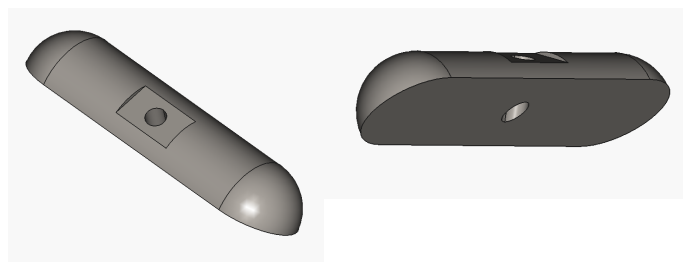


Fig. 1. Schéma des électrodes. Les électrodes sont percées et un méplat est présent sur le dessus de manière à fixer une cosse afin des les connecter à l'alimentation.

Afin d'étudier l'influence de la géométrie des électrodes et donc du champ électrique généré mais aussi du point de contact entre l'isolant diélectrique quatre configurations ont été testées à partir des électrodes qui étaient à notre disposition. Ces configurations sont présentées sur les figures suivantes :

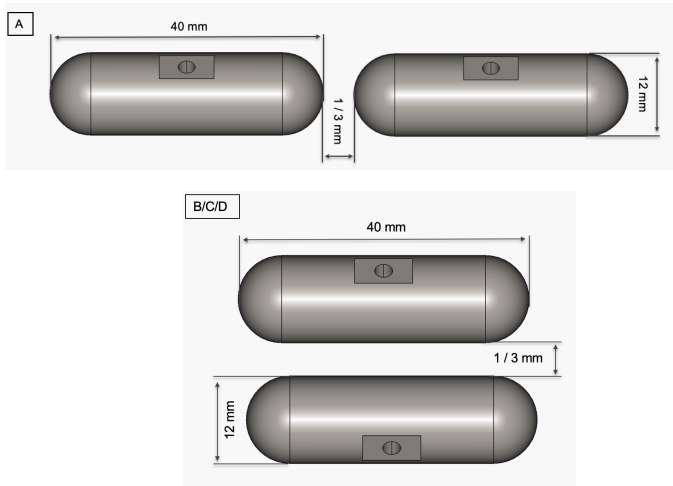


Fig. 2. Disposition des électrodes dans les quatre configurations vue du haut.

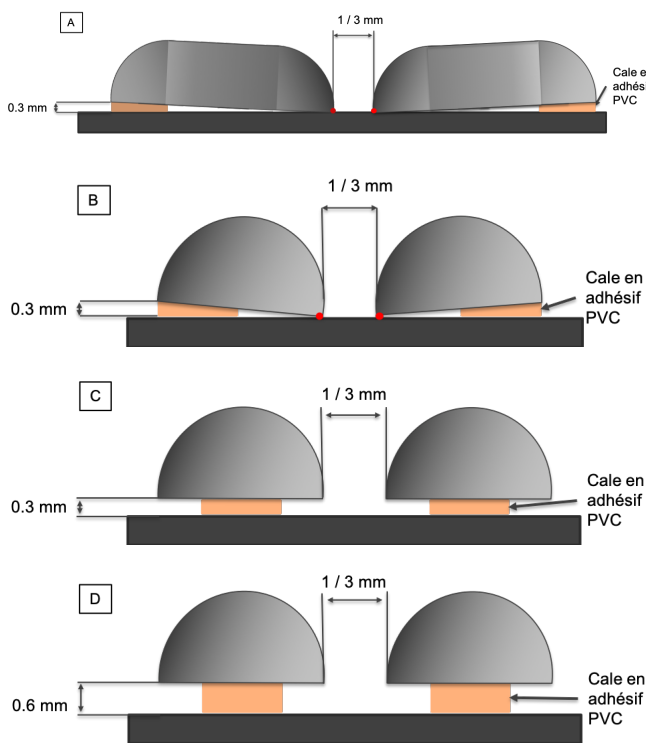


Fig. 3. Disposition des électrodes dans les quatre configurations vue en tranche. En dessous, en gris, la plaque de PEEK de 5mm d'épaisseur.

Dans les deux premières configurations, les électrodes sont volontairement inclinées vers l'avant afin d'imposer un point de contact précis entre l'électrode et l'isolant, situé au bord des électrodes, à l'endroit où elles se font face. Cette disposition résulte de travaux préliminaires ayant révélé une très faible répétabilité des mesures lorsque les électrodes étaient positionnées à plat, au point de rendre les résultats totalement inexploitable.

Dans les configurations A et B, l'orientation des électrodes a été volontairement modifiée. Bien que celles-ci ne soient pas véritablement pointues, un léger renforcement du champ électrique était attendu dans la configuration A par rapport à la configuration B. Les configurations C et D ont quant à elles été conçues dans le but d'éliminer le point de contact entre la

surface isolante et les électrodes, afin de s'affranchir de la difficulté expérimentale liée à son contrôle précis. Dans la configuration D, une distance encore plus importante est imposée entre l'électrode et l'isolant, dans l'objectif d'observer les effets de la proximité de la surface sans qu'il y ait de contact direct avec l'électrode.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Pour tous les résultats présentés dans cette étude la tension d'alimentation est sinusoïdale avec une fréquence de 50Hz et la tension relevée correspond à la tension crête. La tension est appliquée en partant de 0 V et en augmentant l'amplitude du signal de tension à un rythme d'environ 100 V/s. Les mesures réalisées sont les seuils d'apparition des décharges partielles (PDIV) et de claquage (Flashover). Les signaux caractéristiques de ces deux phénomènes sont présentés sur les figures suivantes :

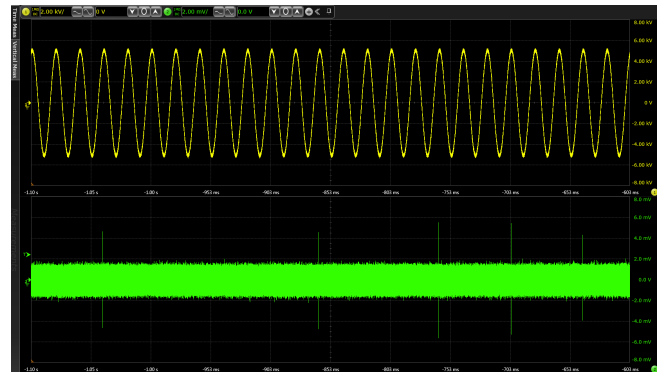


Fig. 4. Signaux électriques caractéristiques d'un système en présence de décharges partielles, en jaune la tension, en vert un courant mesuré par la pince présentée plus haut.

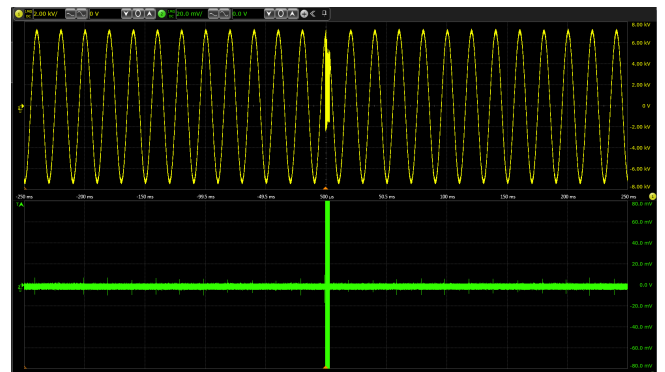


Fig. 5. Signaux électriques caractéristiques d'un système en présence d'un Flashover, en jaune la tension, en vert un courant mesuré par la pince présentée plus haut.

Pour la mesure du PDIV on cherche à obtenir un régime où les décharges partielles sont entretenues sans toutefois exiger une décharge par alternance ou demi-alternance. On effectue également toutes les mesures du PDIV avant d'effectuer les mesures de Flashover. En effet, nous avons observé qu'un claquage en surface, bien que nous limitons le courant de sortie de l'amplificateur, affectait la surface et les mesures suivantes du PDIV.

Les figures suivantes présentent les résultats de ces deux mesures sur les différentes configurations d'électrodes présentées plus haut :

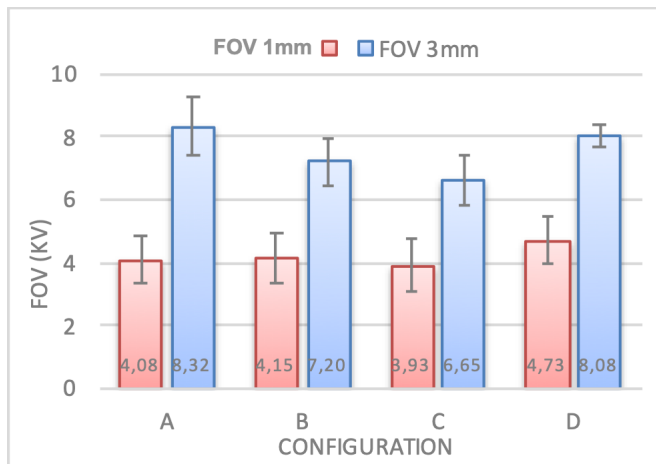


Fig. 6. Résultats des mesures de Flashover.

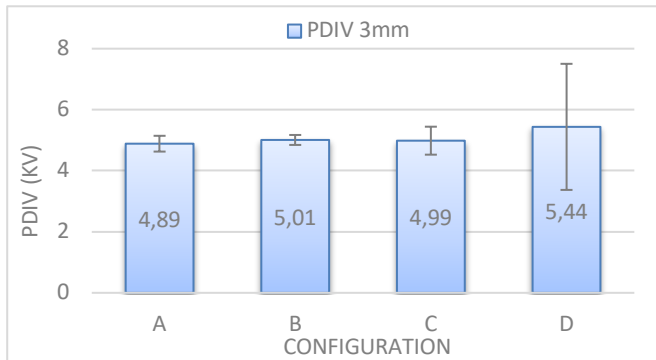


Fig. 7. Résultats des mesures de PDIV.

L'incertitude représentée ici est statistique il s'agit de $\pm 3\sigma$, chaque mesure a été répétée au moins dix fois en repositionnant les électrodes plusieurs fois.

Sur ces résultats on présente uniquement des mesures de PDIV pour une distance inter-électrodes de 3 mm. En effet, dans l'ensemble des essais réalisés avec une distance inter-électrodes de 1 mm on passe directement au claquage (FOV) sans observer de régime de décharges partielles. On considérera donc les mesures de PDIV et FOV identiques à 1 mm.

Sur la figure 6, on observe une tension de FOV supérieure de plus de 1 kV pour la configuration A par rapport à la configuration B, dans le cas d'un espacement inter-électrodes de 3 mm. Toutefois, cette différence reste à interpréter avec prudence, car les incertitudes associées sont relativement importantes au regard de l'écart observé. De plus, cette tendance ne se vérifie pas pour les mesures réalisées avec une distance inter-électrodes de 1 mm, où les tensions mesurées dans les configurations A et B sont pratiquement identiques.

Une diminution cohérente du niveau de tension de FOV est observée pour la configuration C, aussi bien à 1 mm qu'à 3 mm de distance inter-électrodes, par rapport aux configurations A et B. Toutefois, cette tendance doit être interprétée avec prudence en raison des incertitudes liées à la répétabilité des mesures.

Concernant la mesure du PDIV (figure 7) avec un espacement inter-électrodes de 3 mm, aucune variation significative n'est observée pour les trois premières configurations. Seule la

configuration D se distingue, affichant un PDIV plus élevé ainsi qu'une incertitude nettement plus importante. Dans cette configuration, les résultats se répartissent en deux groupes : certains PDIV sont proches de 5 kV, comparables aux autres configurations, tandis que d'autres atteignent des tensions bien plus élevées, autour de 6 kV. Ce niveau de tension correspond au seuil d'apparition de décharges partielles sur le système d'alimentation à vide.

Dans cette dernière configuration, l'incertitude observée pourrait donc s'expliquer par l'alternance entre des mesures de PDIV correspondant au dispositif d'alimentation et d'autres liées aux électrodes elles-mêmes. Cette variabilité serait notamment due à l'épaisseur et à la flexibilité de la cale en PVC souple. En effet, les électrodes sont maintenues en place par un support, avec une vis exerçant une pression pour assurer leur fixation. Toutefois, la souplesse de la cale peut entraîner une légère inclinaison de l'électrode, difficilement reproductible d'une mesure à l'autre.

4. SIMULATION

Afin d'évaluer l'influence du point de contact et de la géométrie sur la mesure du seuil de décharge partielle (PDIV), nous avons réalisé des simulations numériques à l'aide du logiciel AIRLIFTv3, développé par l'IRT Saint-Exupéry. AIRLIFT est un outil de calcul basé sur la théorie de Townsend, permettant d'estimer le seuil d'apparition des décharges partielles. Ce logiciel est conçu pour s'interfacer avec COMSOL Multiphysics (version 5.6 utilisée ici) via le module LiveLink, ce qui nous permet d'intégrer de manière efficace des géométries complexes, des propriétés matériaux spécifiques ainsi que des conditions aux limites adaptées.

L'ensemble des résultats de simulation présentés dans cette étude a été obtenu à partir d'un modèle électrostatique en 2D. Des simulations en 3D ont été menées pour la configuration A, sans qu'aucune différence significative ne soit observée par rapport aux résultats en 2D. Cette configuration est pourtant celle où l'on s'attend à ce que la modélisation 3D ait le plus d'impact sur la distribution du champ électrique (renforcement de champ le plus important entre les électrodes). Face au faible gain en précision et au coût de calcul nettement plus élevé, nous avons choisi de réaliser l'ensemble des autres simulations en 2D.

Pour déterminer les valeurs minimales de PDIV liées à la géométrie, les paramètres de Paschen suivants, issus de la littérature, ont été utilisés : **A = 15 Torr⁻¹·cm⁻¹**, **B = 365 V·Torr⁻¹·cm⁻¹** et **$\gamma = 0,01$** . Les simulations ont été menées en supposant une pression atmosphérique de **1013 mbar** et une température ambiante de **20 °C**.

Des simulations ont été effectuées pour les quatre configurations, en considérant une distance inter-électrodes de 1 mm. Les configurations A et B présentent des similitudes marquées, tout comme les configurations C et D. Par souci de clarté et de concision, seules les configurations B et C seront présentées dans les figures qui suivent.

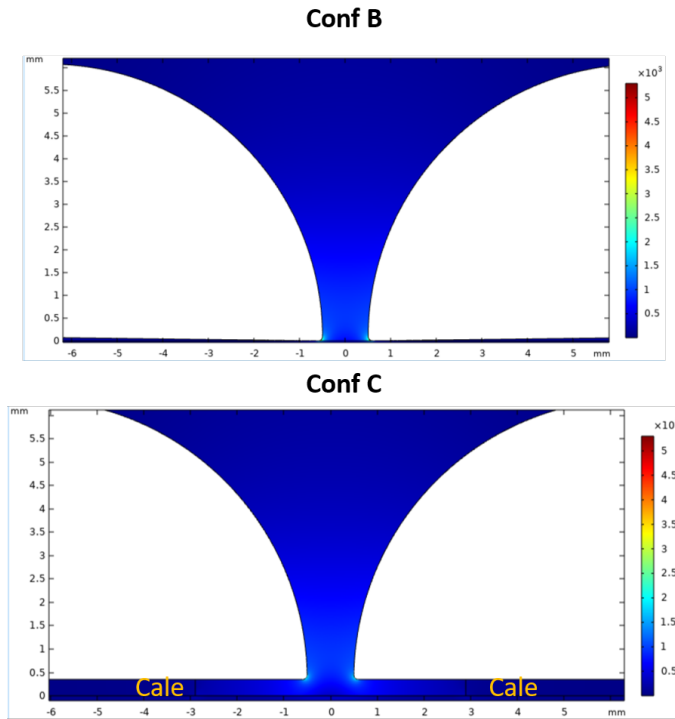


Fig. 8. Distribution du champ électrique en échelle de couleur (V·cm⁻¹), le potentiel de l'électrode de gauche est fixé à 0 V et celle de droite à 1 V.

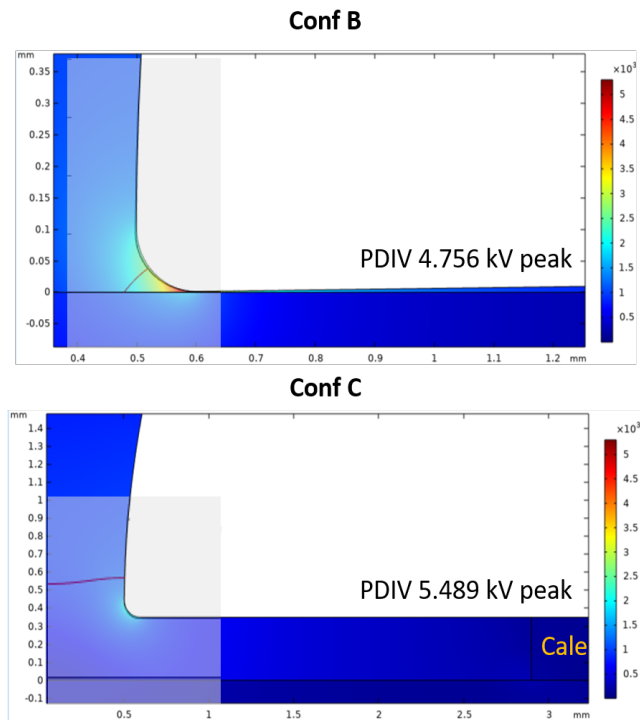


Fig. 9. Distribution du champ électrique en échelle de couleur (V·cm⁻¹), le potentiel de l'électrode de gauche est fixé à 0 V et celle de droite à 1 V.

Dans la configuration B (et également dans la configuration A) la ligne de champ correspondant au PDIV s'attache à la surface de l'isolant très proche de l'électrode, elle s'attache de manière symétrique à l'autre électrode. On observe que cette ligne de champ ne passe pas par la zone où le champ est le plus élevé. En effet, le champ se renforce dans la zone où la distance entre l'électrode et l'isolant diminue, en s'approchant du point triple.

La ligne de champ du PDIV correspond à un minimum de la courbe de Paschen.

Dans la configuration C la ligne de champ correspondant au PDIV passe directement d'une électrode à l'autre sans s'attacher à la surface de l'isolant.

Cela pourrait expliquer le passage direct au claquage (FOV) observé expérimentalement pour une distance inter-électrodes de 1 mm, sans phase intermédiaire de décharges partielles. Dans les configurations A et B, bien que les lignes de champ associées au PDIV soient attachées à la surface, la première ligne de champ critique reliant directement les deux électrodes correspond à une tension à peine supérieure au PDIV — environ 200 V.

5. COMPARAISON EXPERIMENTALE NUMERIQUE

La figure suivante compare les résultats de la mesure de FOV pour une distance de 1mm qui est supposée être également la mesure de PDIV avec les valeurs de PDIV issues de la simulation :

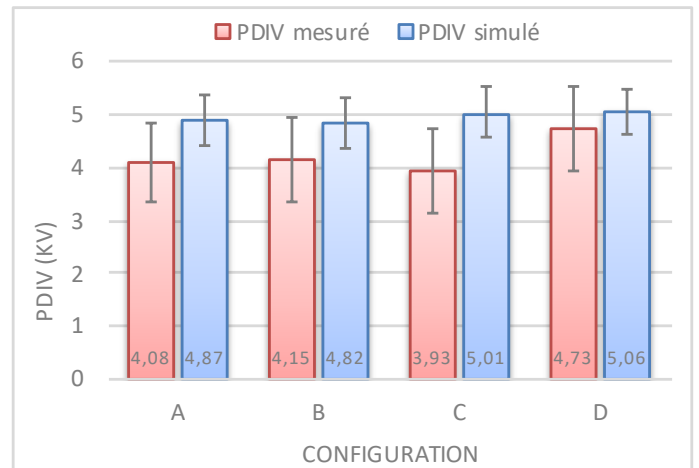


Fig. 10. Comparaison entre les résultats expérimentaux et simulés.

Dans les simulations, les paramètres géométriques et matériaux ont été volontairement variés de $\pm 10\%$ afin de prendre en compte les incertitudes potentielles sur les données d'entrée. Les incertitudes ainsi générées sont présentées dans la figure 10.

Sur cette figure, en tenant compte des incertitudes expérimentales ainsi que de celles introduites dans les simulations, on observe un bon accord global entre les valeurs mesurées et simulées. L'écart le plus significatif apparaît pour la configuration C, avec une différence supérieure à 1 kV, tandis que le meilleur accord est obtenu pour la configuration D, avec un écart d'environ 300 V. Il est également à noter que les valeurs de PDIV issues des simulations sont systématiquement plus élevées que celles obtenues expérimentalement.

Bien que les écarts restent faibles et soumis à des incertitudes, les tendances observées expérimentalement ne sont pas entièrement reproduites par les simulations. Les mesures montrent peu de différence entre les configurations A et B, une légère diminution du PDIV en configuration C, puis une

augmentation plus marquée en configuration D. En revanche, les simulations donnent des résultats presque identiques pour les configurations A et B, ainsi que pour les configurations C et D, avec des tensions de PDIV globalement plus élevées pour ces dernières.

6. CONCLUSION

Il est intéressant de noter que, si la maîtrise du point de contact entre les électrodes et l'isolant constitue un facteur clé pour assurer la répétabilité des mesures de défauts d'isolement en surface, cette étude montre également que des résultats très similaires peuvent être obtenus en supprimant ce contact direct. En effet, avec des électrodes identiques légèrement surélevées — de manière à éviter tout contact direct avec la surface de l'isolant —, les seuils d'apparition des défauts d'isolement restent comparables voire à des niveaux de tension légèrement plus faibles.

Le bon accord observé entre les mesures et les simulations pour la configuration D — la configuration la moins influencée par les effets de surface —, ainsi que la surestimation systématique du PDIV simulé par rapport aux valeurs mesurées, suggèrent que les effets liés à la surface ne sont pas pleinement pris en compte dans le modèle de simulation.

L'ensemble des mesures réalisées met en évidence de faibles variations dans l'apparition des défauts d'isolement entre les différentes configurations d'électrodes testées dans un environnement propre et sec. Dans de telles conditions, les risques de défaillance sont faibles, les niveaux de tension nécessaires à l'apparition de décharges étant relativement élevés, même lorsque les distances entre pièces conductrices à nu sont de l'ordre du millimètre. En revanche, il est attendu que ces risques augmentent significativement en présence de pollution de surface, qu'il s'agisse de dépôts conducteurs solides (comme de la poussière), d'humidité, de résidus liquides ou d'une combinaison de ces éléments. Dans ce contexte, des défauts d'isolement devraient apparaître à des tensions bien plus faibles et sur des distances

plus importantes. D'importantes difficultés de répétabilité sont également à prévoir, cette fois en raison du contrôle délicat de la pollution et de son mode de dépôt.

7. REFERENCES

- [1] IEC-60664-1 - Insulation Coordination for Equipment Within Low Voltage Systems.
- [2] IEC-60112 - Measuring the Resistance of Solid Isolating Materials to Tracking.
- [3] MIL-HDBK-454B - department of defense handbook: general guidelines for electronic equipment.
- [4] W. Li, I. Cotton, et R. Lowndes, « Development of a Test Method for Validation of Creepage Distances in High Voltage Aerospace Power Systems », in *2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, juin 2020, p. 517-520. doi: 10.1109/EIC47619.2020.9158720.
- [5] P. von Schau et W. H. Middendorf, « An International Research Project to Determine New Dimensioning Rules for Creepage Distances », *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-18, n° 2, p. 158-162, avr. 1983, doi: 10.1109/TEI.1983.298661.
- [6] W. Pfeiffer, K. Richter, et P. V. Schau, « Electric Strength of Small Creepage Distances under Natural Environmental Conditions », *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-19, n° 6, p. 586-593, déc. 1984, doi: 10.1109/TEI.1984.298715.
- [7] K. Ermeler et W. Pfeiffer, « Dimensioning of creepage distances under humidity conditions - water adsorption test », in *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, oct. 2002, p. 101-104. doi: 10.1109/CEIDP.2002.1048746.
- [8] K. Takagi, D. Suzuki, et T. Yamada, « Discharge Characteristics of an Insulator Creepage Surface under Various Humidity Conditions », in *2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, nov. 2022, p. 519-523. doi: 10.23919/CMD54214.2022.9991657.
- [9] H. Suzuki, Y. Hayase, et K. Yamashiro, « Study on Creepage Dielectric Insulation under Combined Salt Pollution, High Humidity and Transient Air Pressure », in *2020 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, oct. 2020, p. 51-54. doi: 10.1109/CEIDP49254.2020.9437532.
- [10] C. Van de Steen, C. Abadie and G. Belijar, "Partial discharge detection, Experimental-Simulation Comparison and actual limits," *2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Knoxville, TN, USA, 2020, pp. 537-541, doi: 10.1109/EIC47619.2020.9158654.