

Analyse de l'effet de la tension sur l'érosion d'un polymère induite par des décharges partielles

LAGARRIGUE Hugo¹, BELINGER Antoine², NAUDÉ Nicolas², JEBLI Mourad¹, BELIJAR Guillaume³

¹ IRT Saint-Exupéry, Toulouse, France

² LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

³ SAFRAN TECH, Parc d'Activité d'Andromède, 1 Rue Louis Blériot CS80049, Toulouse, France

RESUME – Cet article présente des résultats expérimentaux d'érosion de films de Kapton pour plusieurs conditions de test avec et sans gap gazeux. Le banc de mesure développé pour ces expériences permet d'appliquer une contrainte électrique sur un film polymère entraînant l'apparition de décharges partielles dont l'énergie est mesurée à intervalles réguliers. Le but de l'étude est de faire un lien entre l'énergie électrique et l'érosion du film, l'activité des décharges et la durée de vie. L'analyse des profils d'érosion montre une forte influence de l'amplitude de la tension sur la forme du profil. En effet, l'augmentation de la tension entraîne des érosions spatialement plus étalées mais de moindre profondeur que ce qui est observé pour une tension proche du seuil PDIV. L'impact de la présence d'un gap gazeux entre l'électrode et le film isolant est aussi discuté dans cette étude, il représente un cas critique en termes d'érosion comparée au cas avec contact.

Mots-clés—décharge partielle, érosion, énergie, masse érodée, PDIV, charge

1. INTRODUCTION

La réduction des émissions de CO₂ dans l'aéronautique est devenue une priorité face aux défis environnementaux. En effet, l'aviation représente une part significative des émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi au réchauffement climatique. Le passage à l'énergie électrique est un moyen pour optimiser la consommation et réduire le recours au kérosène [1]. Cette évolution implique l'augmentation de puissances électriques embarquées. L'élévation de la puissance peut être réalisée soit avec une augmentation de tension, soit avec une augmentation du courant. L'augmentation du courant nécessite une augmentation de la section des conducteurs nécessaires et donc de la masse embarquée. L'autre solution, l'augmentation de la tension, peut générer des phénomènes physiques qui dégradent le système d'isolation électrique. Un des phénomènes pouvant apparaître en haute-tension est la présence de décharges partielles (DP) [2][3][4]. Ces décharges induisent une dégradation des matériaux isolants pouvant aller jusqu'à la transition à l'arc [5]. Dans cet article, nous étudions l'effet des décharges partielles sur l'érosion d'un matériau isolant. Dans un premier temps, nous présenterons le banc d'essai qui permet d'appliquer la contrainte électrique et de réaliser des caractérisations électriques des décharges. Ensuite, nous étudierons les mesures d'érosion en fonction de l'amplitude de la tension sinusoïdale appliquée et de la durée de test. Dans cette étude, nous avons mesuré l'énergie des décharges au cours du temps pour corréliser cette dernière avec le processus de l'érosion.

2. PRINCIPE DE MESURE

Le banc de mesure développé se compose d'une source de tension sinusoïdale, d'une cellule d'érosion, d'une capacité et d'une sonde de tension (Figure 1). La cellule d'érosion permet de placer l'échantillon entre une bille reliée à la sortie haute-tension de l'alimentation et un plan qui est relié à la référence de l'alimentation (Figure 2). Pour chaque condition de test, 5 échantillons de Kapton sont utilisés. L'épaisseur des échantillons utilisés est de 125 µm.

Le dispositif de mesure permet de mesurer l'énergie des décharges au cours du test. Le principe de la mesure repose sur l'insertion d'une capacité en série avec l'échantillon testé (Figure 1). La mesure de la tension aux bornes de la capacité permet de remonter à la charge transférée, puis à l'énergie des décharges par période [6] (Eq. 1).

$$E = \int Q dV \quad (1)$$

Avec E Energie d'une période (J) ; Q Charge (C) et V Tension appliquée (V)

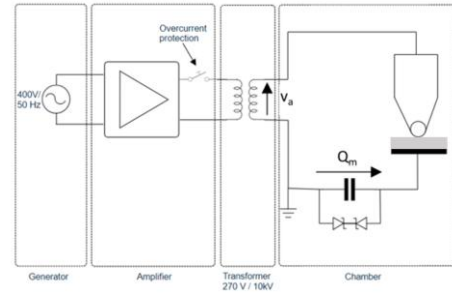


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental de la mesure d'énergie des DP

Les caractéristiques liées à l'érosion, telles que la profondeur et la masse érodée, sont déterminées après la fin de chaque test. A l'aide d'un profilomètre, nous mesurons le profil de l'érosion (Figure 3) en fonction de la position. A partir de la surface érodée, nous déduisons la masse érodée :

$$m = \pi \cdot R \cdot S \cdot M_v \quad (2)$$

Avec m Masse érodée (kg) ; R Rayon (m) ; S Surface (m²) et M_v Masse volumique (kg/m³)

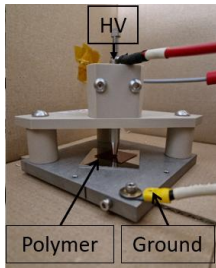


Figure 2 : Cellule de test pour l'étude des décharges partielles

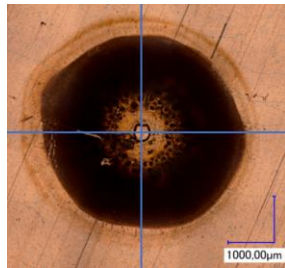


Figure 3. Exemple d'érosion du Kapton après 3 heures à 3kV - 5kHz

Pour chaque échantillon, nous utilisons 4 demi-coupes ce qui permet d'avoir au total 20 demi-coupes (sur 5 échantillons) pour les mêmes conditions de test. Le protocole ainsi utilisé permet d'obtenir la dispersion et d'intégrer ces données en établissant un profil d'érosion moyen.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1. Premier cas : électrode en contact avec échantillon

Les profils d'érosion obtenus à 2 kV et présenté en figure 4 confirment l'influence du temps pendant lequel l'échantillon est soumis à des décharges sur la profondeur d'érosion. Dans cette représentation, la distance (0 mm) correspond au centre de l'échantillon (point contact entre bille et film isolant).

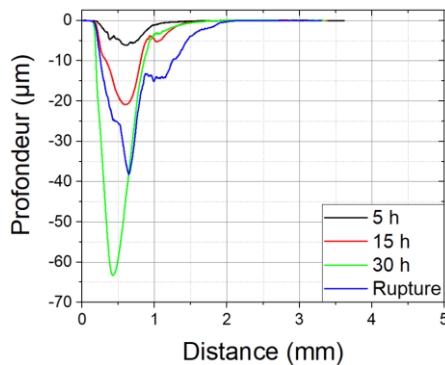


Figure 4. Profil d'érosion Kapton - 2 kV (x1.5 PDIV) / 1 kHz - pour plusieurs durées

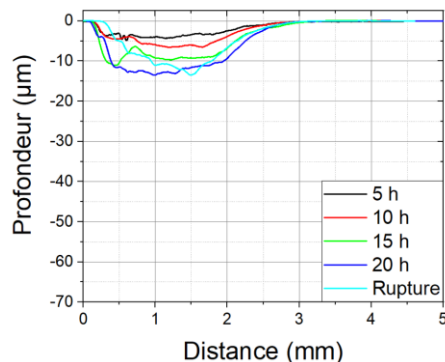


Figure 5. Profil d'érosion Kapton - 3 kV (x2 PDIV) / 1 kHz - pour plusieurs durées

L'érosion est concentrée sur un rayon de 1 mm avec une profondeur proportionnelle à la durée du test. Avec des durées de test plus longues (30 heures), la largeur du profil n'a pas évolué. En effet, avec ces premiers tests la tension est

proche du seuil d'apparition des décharges partielles (1500 V) donc la zone d'apparition des décharges est limitée à proximité de la bille.

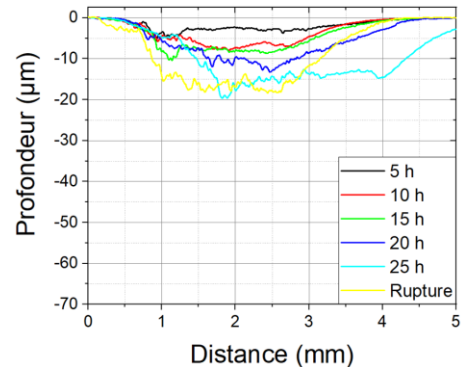


Figure 6. Profil d'érosion Kapton - 4.5 kV (x3 PDIV) / 1 kHz - pour plusieurs durées

Avec l'augmentation de la tension à 3 kV (Figure 5), les profils d'érosion sont plus larges comparés à ceux obtenus à 2 kV. Comme pour le cas des tests à 2 kV, la profondeur d'érosion augmente au cours du temps. Les profils d'érosion obtenus avec 4,5 kV (Figure 6) confirment l'influence de la tension appliquée sur l'étalement de l'érosion. En effet, le rayon de la zone érodée passe de 3 à 4,5 mm en augmentant la tension de 3 à 4,5 kV. La photographie des échantillons après les tests sous décharges (Figure 7) valide les résultats obtenus avec les mesures du profil d'érosion (profilomètre). Nous pouvons identifier l'impact de la tension sur le diamètre d'érosion.

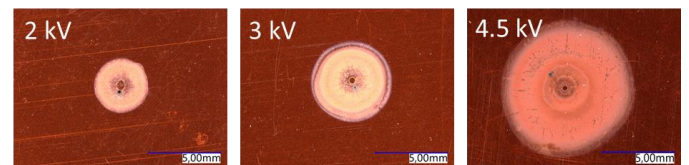


Figure 7. Photographie de Kapton après rupture diélectrique pour plusieurs tensions appliquées

La Figure 8 présente l'évolution de la profondeur d'érosion en fonction du nombre de périodes. Le dernier point de chaque courbe correspond à la rupture diélectrique de l'échantillon.

La pente de chaque courbe (2, 3 et 4.5 kV) est directement impactée par la tension sans une évolution significative avec l'accumulation de périodes. Cette représentation indique l'effet de la tension sur la profondeur d'érosion et la durée de vie. Malgré le fait que la tension 2 kV (x1.5 PDIV) provoque une érosion accélérée en profondeur (Figure 8), la durée de vie pour ce cas est largement supérieure (150 M périodes) comparée aux tests à 3 et 4.5 kV (< 100 M périodes). La représentation de la masse érodée (Figure 9) confirme que le test à 4.5 kV est plus critique. De ce fait, nous constatons que la masse érodée est le paramètre qui présente une meilleure corrélation avec la durée de vie.

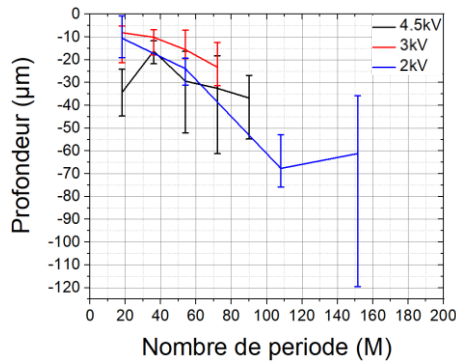


Figure 8. Profondeur de l'érosion en fonction du nombre de périodes

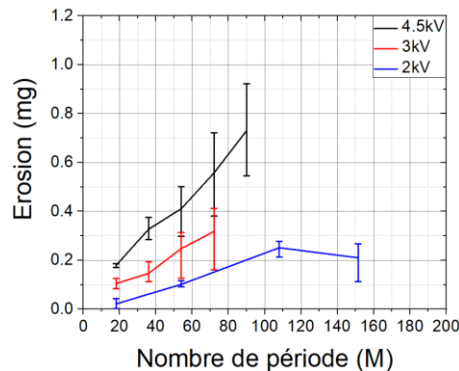


Figure 9. Evolution de l'érosion en fonction du nombre de périodes

Afin d'étudier le lien entre l'énergie des DP et l'érosion du matériau, nous avons tracé l'évolution de la profondeur et de la masse érodée en fonction de l'énergie accumulée des décharges (Figure 10-Figure 11). Ces courbes montrent que la valeur de la tension appliquée modifie la pente et donc la vitesse d'érosion (Figure 11). La courbe montre qu'une tension légèrement au-dessus du seuil PDIV (2 kV) provoque une érosion concentrée avec une vitesse élevée. Avec les tensions plus élevées, la profondeur d'érosion varie lentement avec l'énergie accumulée principalement à cause de l'étalement du profil. L'évolution de la masse érodée (Figure 11) confirme également que la vitesse d'érosion est critique pour le test à 2 kV.

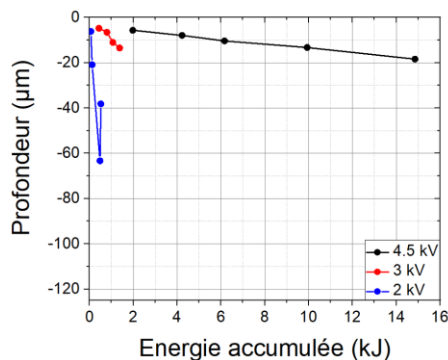


Figure 10. Profondeur de l'érosion en fonction de l'énergie accumulée

Pour une tension fixe, nous constatons une évolution de l'érosion (profondeur et masse) corrélée avec l'énergie accumulée, ceci confirme le lien direct entre l'érosion et l'énergie accumulée des décharges. La proportionnalité entre

ces deux paramètres est conditionnée par l'amplitude de la tension appliquée.

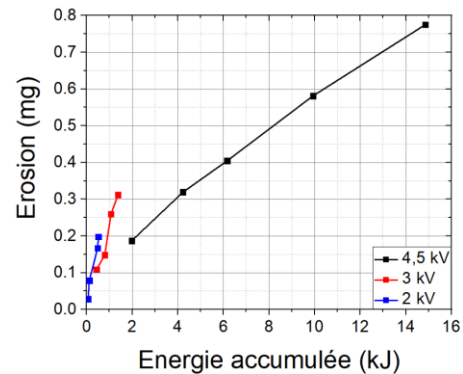


Figure 11. Masse érodée en fonction de l'énergie accumulée

Les valeurs finales de l'énergie accumulée (0.5 à 15 kJ) avant claquage évoluent en fonction de la tension appliquée. Les tests à 4.5 kV (x3 PDIV) ont montré une accumulation d'énergie très élevée avant le claquage (≈ 15 kJ), alors qu'avec les tests à tensions plus basses, l'énergie n'a pas dépassé 2 kJ avant le claquage. En comparant la courbe de l'érosion en fonction de l'énergie accumulée (Figure 11) et le nombre de périodes (Figure 9), nous pouvons constater l'effet de l'énergie des décharges dans la réduction de la durée de vie.

3.2. Deuxième cas : gap gazeux entre électrode et l'échantillon

Dans le deuxième cas, nous avons introduit un gap gazeux d'air (0.2 et 0.3 mm) entre électrode et l'échantillon. Les tensions appliquées pour les tests d'érosion sont plus élevées comparées aux tests du premier cas (bille en contact) afin de compenser la variation du seuil PDIV. Contrairement au premier cas, la ligne du champ électrique provoquant les décharges partielles est localisée au centre de l'échantillon. Les tests ont été réalisés avec une fréquence plus élevée (10 kHz) pour accélérer le processus d'érosion tout en réduisant la durée d'exposition aux décharges.

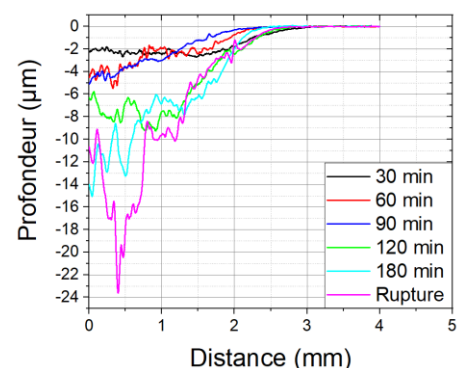


Figure 12. Profil d'érosion Kapton (distance : 0.2 mm) - 2.5 kV (x1.5 PDIV) - 10 kHz - pour plusieurs durées

Les conclusions présentées dans la section précédente (électrode en contact) sont confirmées avec les tests avec un gap gazeux. La durée d'exposition des DP est très critique sur l'évolution de la profondeur d'érosion (Figure 12). Avec l'augmentation de la tension appliquée à 3.6 kV (Figure 13), le rayon de l'érosion est devenu plus large (2 à 3.5 mm).

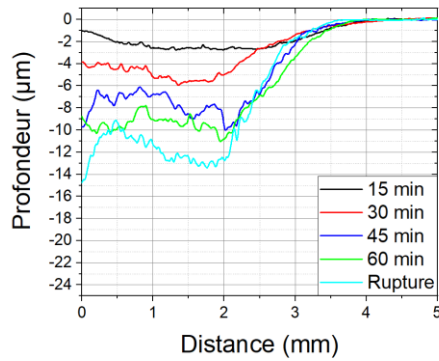


Figure 13. Profil d'érosion Kapton (distance : 0.2 mm) - 3.6 kV (x2 PDIV) - 10 kHz - pour plusieurs durées

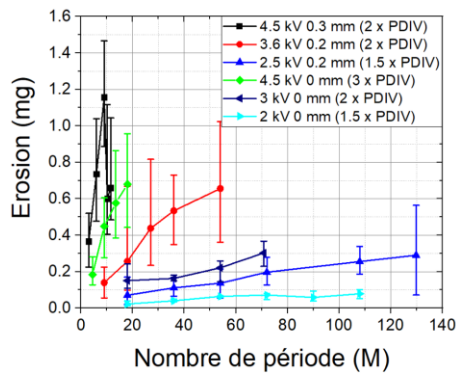


Figure 14. Evolution de l'érosion en fonction du nombre de périodes (en contact, 0.2 et 0.3 mm) - 10kHz

Pour évaluer l'effet de la présence de distance entre l'électrode et l'échantillon sur l'érosion, nous avons tracé sur le même graphique l'érosion pour les différents cas étudiés (en contact, 0.2 et 0.3 mm). La Figure 14 montre que le cas critique qui correspond à une vitesse d'érosion rapide est celui avec une distance de 0.3 mm à 4.5 kV (x2 PDIV) suivi par le cas en contact à 4.5 kV (x3 PDIV). Ceci montre que l'effet de la présence d'un gap gazeux entre électrode et échantillon est plus critique que le dépassement de tension par rapport au PDIV.

La vitesse d'érosion en profondeur affiche la même tendance observée avec la vitesse d'érosion massique. La pente de la courbe associée au test avec distance (0.3 mm) à 4.5 kV est plus élevée comparée aux autres ce qui confirme la criticité de la présence d'un gap gazeux sur le processus d'érosion comme on peut le voir en Figure 15.

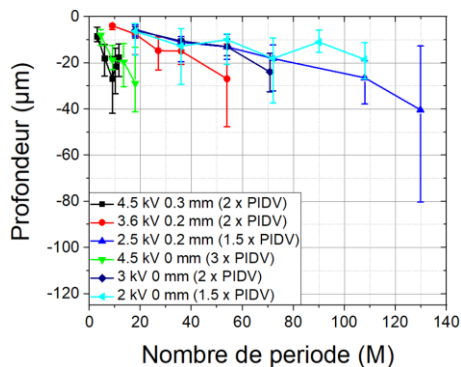


Figure 15. Profondeur de l'érosion en fonction du nombre de périodes (en contact, 0.2 et 0.3 mm - 10 kHz)

4. CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons présenté une étude de l'effet des décharges partielles sur l'état de surface d'un isolant. Deux types de configuration ont été présentés : avec et sans gap gazeux entre l'électrode et le film isolant. Dans les deux cas, l'étude paramétrique en fonction de la tension appliquée et de la durée de test a permis d'identifier leurs effets sur l'érosion. Les tests avec une tension proche du seuil de PDIV confirment une concentration de l'érosion proche de la bille et présente une profondeur d'érosion plus grande par rapport aux tests avec les tensions plus élevées. Les mesures réalisées dans le cadre de cette étude confirment une corrélation entre l'énergie accumulée des décharges et la masse érodée. Cette corrélation est conditionnée par la tension appliquée.

5. REFERENCES

- [1] P. Wheeler et S. Bozhko, « The More Electric Aircraft: Technology and challenges », *IEEE Electrific. Mag.*, vol. 2, n° 4, p. 6- 12, déc. 2014, doi: 10.1109/MELE.2014.2360720.
- [2] F. Koliatene, Th. Lebey, J. P. Cambronne, et S. Dinculescu, « Impact of the aeronautic environment on the Partial Discharges Ignition: A basic study », in *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, juin 2008, p. 603- 606. doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570404.
- [3] P. H. F. Morshuis, « Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, n° 5, p. 905- 913, oct. 2005, doi: 10.1109/TDEI.2005.1522185.
- [4] G. C. Stone, I. M. Culbert, et B. A. Lloyd, « Stator insulation problems associated with low voltage and medium voltage PWM drives », in *2007 IEEE Cement Industry Technical Conference Record*, avr. 2007, p. 187- 192. doi: 10.1109/CITCON.2007.358997.
- [5] R. Acheen, « Détermination et impact de l'existence de décharges partielles dans une chaîne de traction ferroviaire utilisant des composants à base de SiC », Thèse de doctorat, Toulouse 3, 2020. Consulté le: 9 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2020TOU30161>