

Imagerie et Spectroscopie d'Émission d'un Pied d'Arc de Foudre

F. Paillous¹, C. Zaepffel¹, R. Sousa Martins¹, P. Lalande¹, A. Soufiani²

¹DPHY, ONERA, Université Paris Saclay F-91123 Palaiseau

²EM2C, CNRS UPR288, Université Paris Saclay, CentraleSupélec, 91190 Gif-sur-Yvette

mél: fabrice.paillous@onera.fr

Mots clés : foudre, arc impulsionnel, imagerie rapide, spectroscopie d'émission

Introduction

Afin d'optimiser le poids et les propriétés mécaniques des avions, les matériaux composites sont utilisés de manière croissante dans l'aéronautique, notamment en surface des avions. Cependant, ces matériaux possèdent une faible conductivité électrique et thermique. Ils sont donc particulièrement sensibles au phénomène naturel qu'est la foudre. En effet, au point d'impact de la foudre, un fort courant va passer, ce qui entraîne un échauffement local du matériau pouvant dégrader et vaporiser les fibres des matériaux composites. De plus, le courant ayant une augmentation rapide (100kA en 20µs), la formation de l'arc électrique produit une onde de choc qui participe aussi à la détérioration du matériau [1-2]. Pour étudier ce phénomène complexe, de nombreux travaux dans le domaine ont été réalisés pour étudier les effets de la peinture et des protections métalliques sur des panneaux en fibre de carbone [3-4].

Les travaux présentés ci-après consistent en une étude expérimentale de l'interaction plasma/matériaux lors de la réalisation d'un arc foudre impulsionnel sur des matériaux aéronautiques. Pour cela, des diagnostics d'imagerie rapide et de spectroscopie ont été réalisés pour permettre d'étudier les propriétés de l'arc proche du matériau. L'utilisation de diagnostics optiques se prête à l'étude d'arc de type foudre, car il s'agit d'un phénomène intensément lumineux. Les mesures quantitatives obtenues lors de ces études doivent permettre à terme de fournir les données nécessaires à la validation de codes de simulations MHD d'arc foudre ainsi qu'à l'obtention de données d'entrée de contrainte mécanique et thermique.

Moyen d'essai

Les essais expérimentaux ont été réalisés sur le banc d'essai GRIFON de l'ONERA. Ce banc permet la reproduction d'arcs électriques simulant la foudre aéronautique, telle qu'elle est décrite dans la norme aéronautique de certification de la foudre ARP5412 [5-6]. L'onde de courant étudiée, dite onde D, correspond à une bi-exponentielle de courant maximum 100 kA pour une dérivée à $t=0$ s de 10^{10} A.s⁻¹. La figure 1 représente le schéma du montage ainsi que les mesures de courant obtenues pour les trois types d'échantillons étudiés.

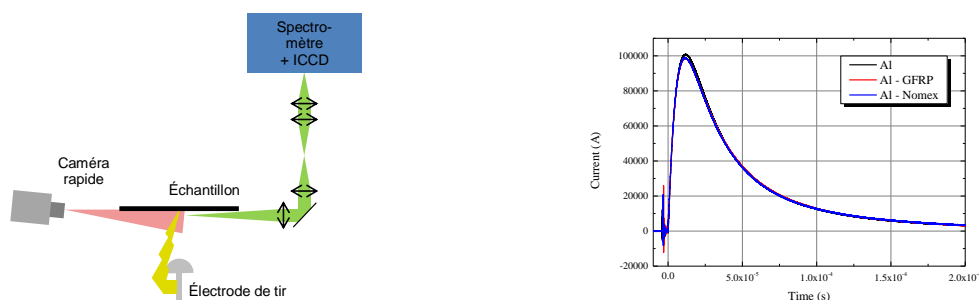


Figure 1: schéma du montage expérimental (gauche), mesure de courant (droite)

Échantillons

Pour simplifier les études et pour permettre une bonne maîtrise de leur propriété, des échantillons académiques simulant la peau d'un avion ont été réalisés. Ces échantillons doivent permettre de décorrélérer l'influence des différentes couches de la peau d'un avion : fibre de carbone, protection métallique, peinture dans le cas d'un fuselage en carbone et aluminium. Les échantillons étudiés sont des panneaux carrés de 400 mm de côté.

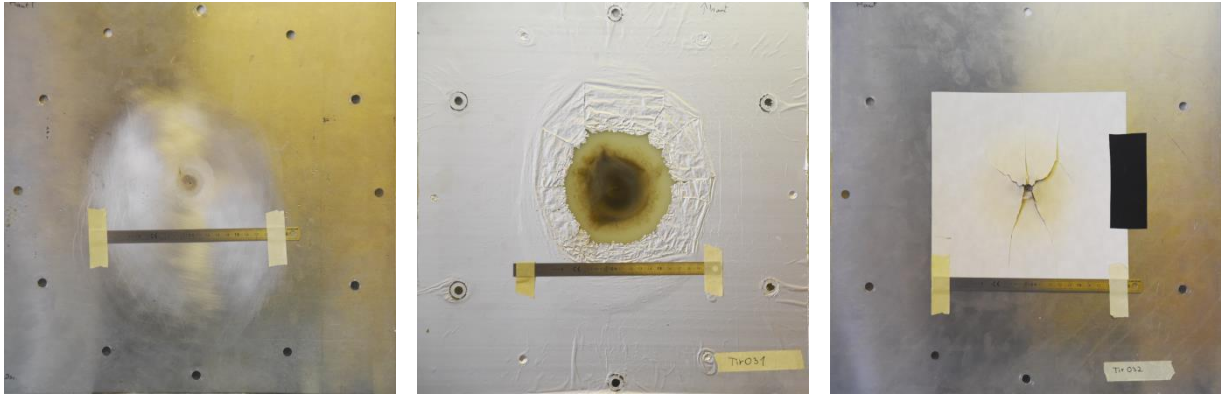


Figure 2: Photographies des trois types d'échantillons après essais, Aluminium (gauche), film aluminium + GFRP (centre) et Aluminium + Nomex (droite)

Le premier type d'échantillon correspond à des plaques d'aluminium aéronautique de 1,6 mm d'épaisseur. Les mesures obtenues sur ce type d'échantillon sont utilisées comme références pour les comparaisons avec les autres échantillons, l'endommagement d'une onde D est faible. Le second type d'échantillon permet d'étudier les effets de la peinture sur un fuselage en aluminium. Il s'agit d'une plaque en aluminium aéronautique (1,6 mm d'épaisseur) sur laquelle est collée un matériau diélectrique de 250 μ m d'épaisseur (Nomex®). L'utilisation d'une feuille de Nomex comme matériau diélectrique permet d'avoir une maîtrise plus importante de la régularité de l'épaisseur (variabilité de 10 μ m) en comparaison d'une peinture aéronautique classique (variabilité de 100 μ m [5]). Avant essai, le diélectrique est percé d'un trou de diamètre 6 mm dans cette étude. Ce percement initial permet de mieux maîtriser la répétabilité des essais qui est difficile dans le cas de panneaux peints, toutefois certains effets comme la cohésion et l'adhérence demandent à être comparés. De plus, la peinture se dégrade sous forme de particules qui gênent les diagnostics optiques. Le diélectrique limite l'expansion du pied d'arc et l'endommagement est supérieur au cas aluminium. Le dernier type d'échantillon permet d'étudier les effets d'une protection métallique sur un matériau composite. Ce dernier type d'échantillon est réalisé en collant une feuille d'aluminium de 10 μ m d'épaisseur sur une plaque en fibre de verre d'épaisseur 2 mm. Des travaux similaires ont déjà été effectués sur panneau en fibre de carbone [7], cependant ce type de matériau peut engendrer des fuites de courant ainsi qu'une anisotropie des caractéristiques mécaniques. Le choix s'est porté sur un film d'aluminium plutôt qu'un « mesh » de cuivre utilisé en aéronautique, ce dernier n'ayant pas une conductivité électrique isotrope. Pour finir, afin de réaliser un pied d'arc impulsif axisymétrique durant une durée raisonnable, un fil de carbone est utilisé pour déclencher l'arc [8].

Suivi de l'expansion de l'arc

L'objectif de ce diagnostic est d'étudier l'influence du matériau sur les propriétés d'expansion de l'arc. Une caméra rapide Phantom V710 a été utilisée pour étudier, en incidence rasante du matériau, les propriétés de l'arc. La résolution est de 48x256 pixels pour une cadence de

370 kfps. Cette fréquence d'acquisition est suffisante pour pouvoir étudier l'élargissement de l'arc au cours de la montée du courant.

Dans le cas de l'aluminium aéronautique (Figure 3), la forme de l'arc est peu influencée au niveau de l'interface plasma/matériau. Seule une légère constriction proche du matériau est visible. La constriction correspond à 14% à 9 μ s et 16% à 18 μ s du diamètre de la colonne de l'arc. Dans le cas du Nomex, la constriction de l'arc au plan d'interaction est imposée par le diamètre initial de 6 mm. Toutefois, le diamètre de la base de l'arc est croissant, car le Nomex est déchiré lors de l'impact foudre. Dans le cas d'étude des effets d'une protection métallique, la base du pied d'arc s'élargit plus rapidement que la colonne de l'arc ce qui est dû à la vaporisation du film aluminium, le panneau en fibre de verre support (GFRP) étant isolant. Il y a aussi apparition d'une constriction intermédiaire entre la partie basse de l'arc et la colonne observable sur les profils des rayons figure 4. Cette constriction peut s'expliquer par une superposition d'une onde de choc provenant de l'échantillon et de la vaporisation ainsi que celle de la colonne d'arc. Il est à noter que la vitesse d'expansion de la base de l'arc, dans ce cas et dans les premiers instants, correspond à l'expansion de l'onde de choc de la colonne d'arc libre [8].

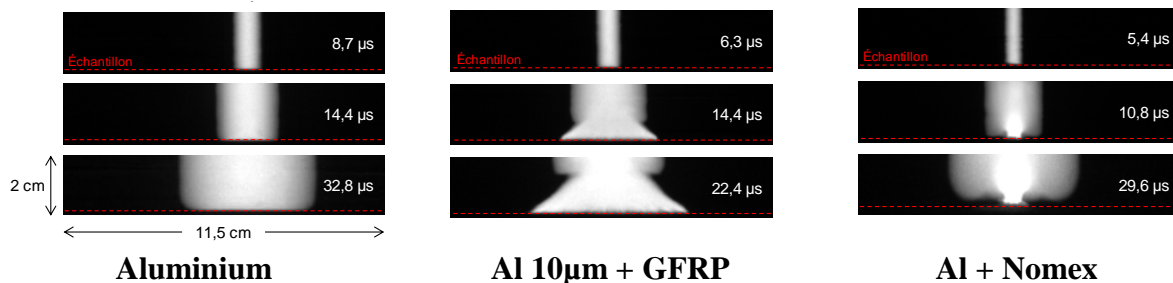


Figure 3: Imageries rapides à plusieurs instants pour les trois types d'échantillons testés

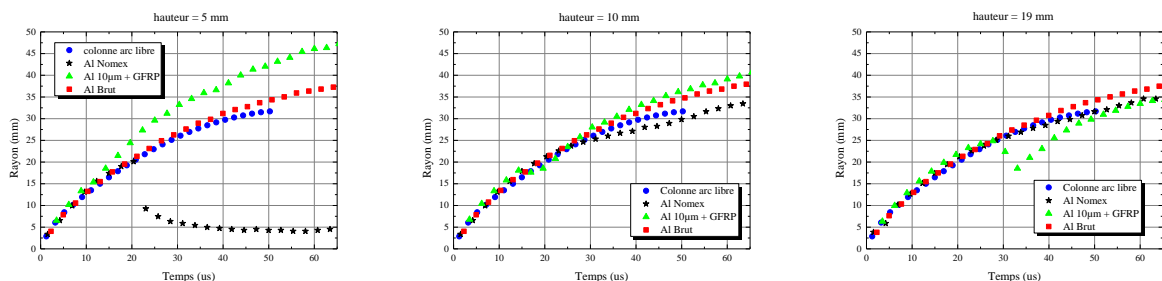


Figure 4: rayon du pied d'arc pour les hauteurs 5, 10 et 19 mm en fonction du temps

Spectroscopie d'émission

Le montage de spectroscopie d'émission est un montage direct incluant un périscope pour une plus grande souplesse, l'objectif étant d'étudier les profils de pied d'arc à plusieurs distances de l'échantillon. Un chemin optique du montage de 2,2 m permet d'éloigner suffisamment le spectromètre Acton SP2750 et sa caméra ICCD Pimax 2 du bruit rayonné par le banc d'essai. L'ensemble du montage a été optimisé pour permettre une observation en rayon quasi parallèle, diminuer les aberrations optiques et se placer en limite de diffraction.

La figure 5 présente les premiers spectres obtenus, l'objectif étant de déterminer les espèces présentes dans le milieu à divers instants. Les mesures de spectroscopie d'émission présentées ont été effectuées à une distance de 2 mm de l'échantillon d'aluminium aéronautique (Al 2024-T3 : Al 92%, Cu 4%, Mg 1,5%, Mn 0,6%, autres espèces minoritaire).

Les raies d'émission représentées sont obtenues par l'utilisation d'une loi de Saha généralisée [9]. Ces valeurs ont été calculées avec la base de donnée du NIST en supposant une

température de 2 eV et une densité électronique de $2.10^{18} \text{ cm}^{-3}$ qui sont des valeurs attendues pour la colonne d'arc libre [8]. Cette approche n'est pas suffisante pour permettre de remonter aux grandeurs physiques du plasma, cependant elle est suffisante pour permettre l'identification des différentes raies d'émission présentes. Elle permet la mise en évidence de la vaporisation de l'aluminium dans le plasma d'air à partir de $15 \mu\text{s}$ ainsi qu'une prédominance des raies Al^+ par rapport à N^+ dans le cas protection aluminium $10\mu\text{m}$ sur panneau fibre de verre.

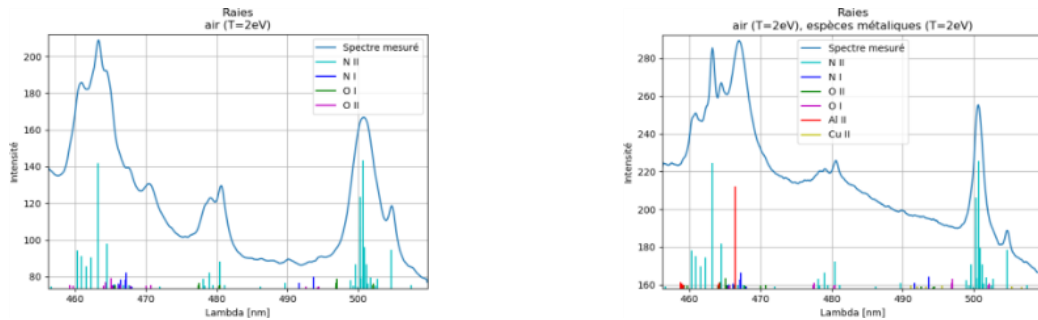


Figure 5: spectres intégrés sur aluminium aéronautique à 2 mm de l'échantillon ($5 \mu\text{s}$ à gauche et $15 \mu\text{s}$ à droite)

Conclusion

Pour améliorer la compréhension de l'interaction plasma/matériaux dans le cas d'arc foudre, des diagnostics optiques ont été développés. L'imagerie rapide a permis la mise en évidence de l'influence de l'échantillon sur l'expansion de l'arc. Les mesures sur échantillons simulant la peinture ont soulevé de nouvelles questions qui invitent à la réalisation d'un montage de Schlieren pour comprendre l'influence de l'onde de choc initiale sur la morphologie de l'arc induit par l'expansion rapide du plasma ou par la vaporisation de la protection.

Les mesures de spectroscopie ont mis en évidence la diffusion d'espèces métalliques dans le plasma. Une étude de spectroscopie plus détaillée est prévue pour mesurer les propriétés thermodynamiques locales du plasma.

Références

- [1] B. Lepetit, F. Soulas, S. Guinard, I. Revel, et I. Peres, Analysis of composite panel damages due to a lightning strike : mechanical effects., ICOLSE 2013.
- [2] Y. Hirano, S. Katsumata, Y. Iwahori, et A. Todoroki, « Artificial lightning testing on graphite/epoxy composite laminate », *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, n° 10, p. 1461-1470, oct. 2010.
- [3] A. Bigand et Y. Duval, Quantification of the mechanical impact of lightning strike protection explosion confined by thick paint, ICOLSE 2017.
- [4] F. Tristant et F. Fustin, Lightning direct effects degradation of composite material depending on paint thickness, ICOLSE 2017.
- [5] AE-2 Lightning Committee, « Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms ARP5412 ». SAE International, 21-févr-2005.
- [6] AE-2 Lightning Committee, « Aircraft Lightning Test Methods ARP5416 ». SAE International, 17-mars-2005.
- [7] R. S. Martins, L. Chemartin, C. Zaepffel, et P. Lalande, « Experimental analysis of lightning arc root behaviour applied to different lightning strike protections », ICOLSE 2017.
- [8] R. Sousa martins, Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, ONERA, 2016.
- [9] H. R. Griem, *Principles of Plasma Spectroscopy*. Cambridge University Press, 1997.