

Description des phénomènes liés à un amorçage humide d'un défaut d'arc électrique

Y. AICHOUN, Th. LEBLANC, M. BOUKHLIFA, R. LANDFRIED, Ph. TESTE

Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 91192, Gif-sur-Yvette, France. Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 75252, Paris, France

RESUME- Le travail présenté ici est une étude des phénomènes précurseurs à l'apparition d'un défaut d'arc en conditions de pression aéronautique au sein d'un faisceau de câbles dans le cas d'un amorçage du défaut par voie humide. Deux phénomènes physiques précédant l'apparition d'un arc électrique ont été observés et caractérisés électriquement : mousse et scintillations. La dynamique de ces phénomènes est lente, les puissances mises en jeu faibles (par rapport aux puissances dans un arc). Cependant, ils peuvent induire des dégâts importants. L'originalité de ce travail se révèle donc dans la caractérisation de ces phénomènes qui précèdent la phase d'arc.

Mots-clés—MEA, défauts d'arcs électriques.

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

Pour des raisons environnementales, économiques et techniques les acteurs du domaine aéronautique envisagent depuis plusieurs années une forte augmentation de la part de l'énergie électrique embarquée [1]. Pour d'évidentes raisons de poids, ceci se traduit par une forte augmentation de la tension des réseaux de bord. Il est ainsi envisagé de monter les tensions jusqu'à +/- 270 VDC et 230 VAC. Dans ces nouvelles conditions des problématiques jusqu'alors inexistantes (lorsque les tensions de réseau étaient plus faibles) vont apparaître, souvent amplifiées par l'effet de pression liée à l'altitude. Parmi celles-ci, on peut évoquer d'une part la problématique liée à la coupure (ou la commutation) des circuits alimentés sous de fortes tensions en régime continu (quelques centaines de volt) et d'autre part la problématique concernant les défauts d'arc électrique. Concernant cette problématique de nombreux travaux sont réalisés dans le domaine de la détection du défaut d'arc [2][3] (qu'elle soit faite par caractérisation électrique, acoustique du défaut ou par réflectométrie), l'étude de la propagation du défaut d'arc[4], ou l'étude des interactions entre un défaut d'arc électrique et son environnement (faisceau de câbles, structures de l'avion ...)[5]. Vis-à-vis des défauts d'arcs électriques la stratégie adoptée par les industriels est de considérer que quelles que puissent être les précautions mises en œuvre, le défaut d'arc sera inévitable. En effet, il existe de nombreuses causes d'apparition du défaut d'arc[6] (vieillissement ou défauts d'isolation, contamination chimique des isolants, mauvaises connexion, etc...). Certaines d'entre elles conduisent à l'apparition rapide du défaut (la perte de connexion brutale, la rupture d'un câble, le court-circuit entre câbles) d'autres peuvent être liées à une dégradation progressive (endommagement progressif du câble par frottement...) qui au bout d'une durée qui peut s'avérer longue conduisent à l'apparition de l'arc. Ainsi une grande partie des travaux du

domaine portent sur la détection du défaut d'arc et la mise en sécurité « rapide » de la partie de réseau concernée. Le sujet abordé ici est consacré à un phénomène assez peu étudié dans le domaine de l'aéronautique : l'étude des phénomènes précurseurs du défaut d'arc dans le cas d'un amorçage par voie humide. Nous nous sommes donc intéressés aux différentes phases précédant l'apparition des défauts d'arc, à leur chronologie et à leur évolution. Nous portons également un intérêt particulier à l'influence de la tension d'alimentation, de la pression, etc... sur l'apparition et le déroulement de ces phases.

Dans une première partie un rapide rappel bibliographique sera présenté. Dans une seconde partie le dispositif expérimental et les moyens de mesures associés seront décrits. Les résultats seront ensuite décrits. Une partie suivra dédiée à la discussion des résultats.

1.2 Rapide rappel bibliographique

D'une manière générale, peu de travaux ont été réalisés dans le but d'étudier les phénomènes précurseurs aux défauts d'arcs dans le cadre d'un amorçage humide en condition de pression et tension aéronautique. Cependant, il convient de mentionner des travaux qui ont observé des phénomènes précurseurs dans d'autres contextes d'étude (pression différente et surtout tension plus élevée). Parmi ces travaux, nous pouvons citer G. P. Bruce *et al.* [7] qui se sont intéressés à l'études des performances de l'isolation du caoutchouc de silicium à partir de la norme des tests à plan incliné pour des tensions appliquées de -2,25 kVDC, ainsi que les travaux de Ghunem *et al.* [8] qui ont analysé le tracking et l'érosion des isolants en caoutchouc de silicium à partir de tests à plan incliné en DC, et ont investigué le rôle des charges inorganiques dans ces isolants, pour des tensions appliquées allant de -500 VDC jusqu'à -1,75 kVDC. Les conditions expérimentales dans ces études diffèrent fortement des nôtres notamment en ce qui concerne les tensions appliquées qui sont de l'ordre de quelques kV.

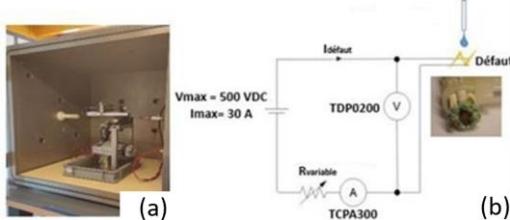
Dans le cadre de l'électrification du domaine aéronautique, on peut citer les travaux de P. L. Cahill *et al.* [9] sur l'occurrence d'arc tracking humide sur des câbles aéronautiques pour des tensions de l'ordre de 220/110 VAC. Au cours de cette étude aucune grandeur électrique n'est mesurée et l'étude s'attache principalement à l'observation de l'état final du faisceau de câble. On peut aussi citer les travaux [10] qui ont porté sur l'étude des propriétés de courts-circuits effectués sur des câbles vieillis afin d'étudier deux types d'isolants. Différentes mesures ont été réalisées, notamment un test de court-circuit humide sur un faisceau de câbles connectés à une source d'alimentation triphasée de 10 kVA, 400 Hz, 120 VAC. On peut aussi citer les

travaux de Campbell *et al.* [11] qui ont étudié la résistance du Kapton (isolant du faisceau de câble), en présence d'un défaut sous une tension de 120 VDC sur un faisceau de câbles. Nous citons également des travaux menés en régime DC sur des câbles utilisés dans des systèmes spatiaux. L'une de ces études expérimentales avaient pour objectif d'étudier la propagation des arcs électriques de défaut sur les câbles spatiaux dans diverses conditions [12], notamment sous vide, à pression atmosphérique normale et à pression atmosphérique enrichie en oxygène. Les tests ont été faits sous une tension de 125 VDC. Enfin on peut rappeler l'étude préliminaire menée au GeePs récemment [13] sur laquelle s'appuie partiellement cette étude.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental, dont une photographie de la partie mécanique est proposée en figure 1.a, a été adapté à partir de la norme AC NF EN 3475-605. Il consiste en un plan incliné de 10 degrés par rapport à l'horizontal sur lequel est fixé un faisceau de 7 câbles aéronautiques coupés en leur extrémité, un central entouré de 6 autres ayant tous les mêmes caractéristiques. Un dispositif de goutte-à-goutte réglable en débit permet de soumettre ce faisceau à des conditions humides contrôlées. L'ensemble est installé dans une enceinte permettant de contrôler la pression. Les expériences ont été réalisées pour deux niveaux de pression : pression atmosphérique pour simuler des défauts apparaissant au niveau du sol et une pression de 200 hPa pour simuler le cas d'un avion volant à une altitude de 12 000 m ce qui correspond à l'altitude classique atteinte par un avion de ligne.

Le faisceau est soumis à des niveaux de tension DC avec toujours le câble central à une polarité et l'ensemble des 6 câbles périphériques à l'autre polarité. Les niveaux de tension imposés sont dans la gamme [50 - 500] VDC.



Le schéma électrique du dispositif est donné en figure 1.b. Une résistance est insérée en série avec le défaut que constituent ces 7 câbles coupés afin de limiter le courant en cas de passage à l'arc électrique et ainsi protéger l'alimentation. Durant ces essais, on mesure la tension aux bornes du faisceau de câble ainsi que le courant y circulant et un enregistrement vidéo est effectué pour associer signaux électriques et observations phénoménologiques de l'évolution du défaut.

Dans la suite, nous présentons une comparaison des phénomènes observés à pression atmosphérique et à 200 hPa.

2.1. Resultats des essais effectués

Quatre phases ont été observées lors de l'évolution du défaut. La figure 2 illustre ces différentes phases. Initialement, une phase de mousse (2.a) apparaît, suivie de l'émergence de scintillations (2.b et 2.c) qui s'intensifient progressivement avec

le temps. Par la suite, le défaut évolue vers la formation d'un arc électrique (2.d), qui peut éventuellement évoluer en un point chaud (2.e). Nous donnons une description détaillée de ces différentes phases par la suite.

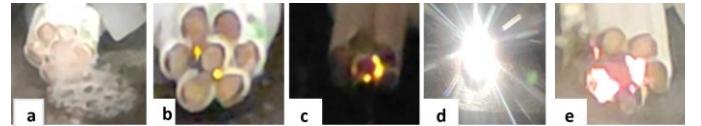


Figure 2.a.Mousse, b. Début des scintillations, c. Scintillations après quelques minutes, d. Arc électrique, e. Point chaud

A. Phase de mousse :

Dès qu'une goutte d'eau contaminée arrive au défaut on voit sur le défaut la formation de quelques bulles (appelée mousse) dans le liquide. Cette mousse est caractérisée par le passage d'un courant de défaut, représenté sur la figure 3 qui illustre l'évolution de l'intensité du courant en orange et de la tension aux bornes du défaut en bleu. L'intensité du courant de défaut varie entre 70 mA et 350 mA avec une valeur moyenne aux alentours de 198 mA. La puissance dissipée dans le défaut de mousse varie entre 3 W et 17 W avec une puissance dissipée moyenne de 9,8 W.

La durée de cette phase dure en général quelques secondes et la durée maximale observée dans nos essais peut aller jusqu'à quatre secondes. Cette première phase est suivie par une seconde phase, dite des scintillations, que nous allons décrire dans la suite.

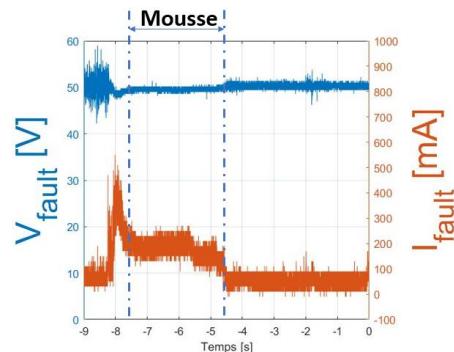


Figure 3. évolution des signaux électriques correspondant aux conditions d'essais: $V_{alim} = 50$ VDC, $P = 200$ hPa, cathode au centre. Phase de mousse

B. Phase de scintillations :

La figure 4 représente l'évolution du courant (en orange) et de la tension aux bornes du défaut (en bleu) au cours de la phase de scintillations.

Au tout début, ces scintillations sont caractérisées par un courant de défaut relativement faible dont la valeur varie entre 5 mA et 121 mA autour d'une valeur moyenne de 58 mA. On peut remarquer que cette phase présente des perturbations au niveau de la tension (courbe bleue) comparativement à la phase précédente de mousse. La puissance dissipée pendant cette phase est inférieure à celle de la phase de mousse, variant entre 0,5 W et 12W, avec une valeur moyenne de 3 W.

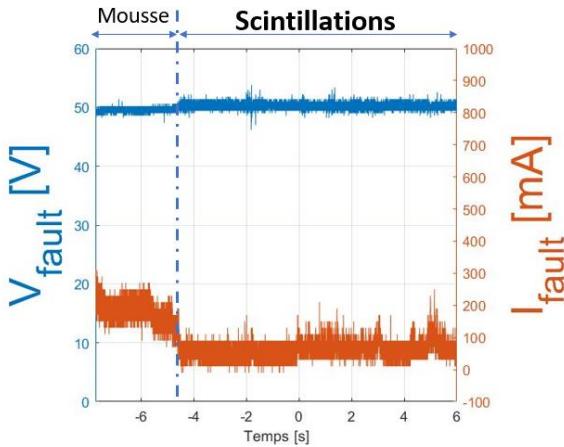


Figure 4. évolution des signaux électriques correspondant aux conditions d'essais: $V_{\text{alim}} = 50$ VDC, $P = 200$ hPa, cathode au centre. Début de la phase de scintillations

Dans une partie des essais, la durée de cette phase a dépassé quelques minutes. Lorsque cela se produit, les scintillations deviennent plus intenses et forment un cercle lumineux autour du câble central. Si cette phase persiste, les scintillations ne se concentrent plus uniquement sur le câble central, mais se propagent sur les isolants des câbles environnants et leurs luminosités deviennent plus intenses. Cette phase est caractérisée électriquement par des perturbations de la tension aux bornes du défaut plus fortes que lors des premières minutes de scintillations. Cela est illustré dans la figure 5 (courant en orange et tension en bleue). On observe durant cette phase, une augmentation de l'intensité du courant de défaut dont la valeur moyenne est de 142 mA (valeurs comprises entre 10 mA et 1,3 A). La puissance dissipée dans le défaut augmente également, variant entre 2 W et 57 W, avec une valeur moyenne de 7 W. Il est à noter que durant cette phase, de l'éjection de matière émanant des câbles conducteurs est observée.

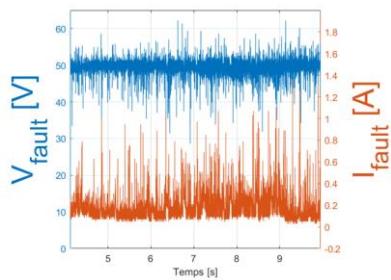


Figure 5. évolution des signaux électriques correspondant aux conditions d'essais: $V_{\text{alim}} = 50$ VDC, $P = 200$ hPa, cathode au centre. Après quelques minutes de scintillations.

La puissance dissipée dans la phase de scintillation est faible cependant l'énergie et la température mises en jeu sont suffisantes pour qu'il y ait érosion du cuivre et éjection de matière. Lorsque le processus se poursuit cela peut entraîner le passage à la troisième phase d'évolution du défaut : la formation d'un arc électrique.

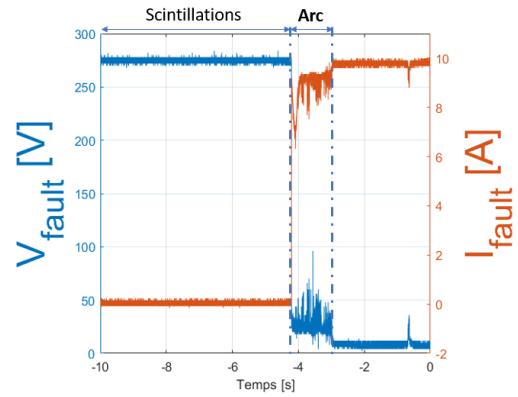


Figure 6. évolution des signaux électriques correspondant aux conditions d'essais: $V_{\text{alim}} = 270$ VDC, $P = 200$ hPa, cathode au centre C. Phase d'arc électrique.

L'évolution vers la phase d'arc électrique est représentée par la figure 6. Cette phase est caractérisée par une augmentation significative du courant (atteignant ici environ 9 A) et de la puissance dissipée dans le défaut, qui peut atteindre une valeur moyenne de 161 W. Cette puissance dissipée est considérablement plus élevée que celle observée lors des phases de scintillations ou de mousse. Par la suite, cette phase peut évoluer de quatre façons différentes : soit par un retour vers les scintillations, soit par un court-circuit, soit par un point chaud, soit par un départ de feu. La phase de scintillations a été caractérisée, celle du départ de feu est un état final destructif qui ne présente pas d'intérêt dans le cadre de cette étude et la phase de court-circuit correspond à une limitation interne du courant ce qui ne permet pas de caractériser le phénomène physique. Nous nous concentrerons alors sur l'évolution du phénomène vers un point chaud.

D. Phase de point chaud :

Dans cette partie est décrite la quatrième phase dite de point chaud, illustrée dans la figure 7, qui représente l'évolution de l'intensité du courant du défaut et de la tension aux bornes du défaut. Un point chaud est un court-circuit qui génère de la chaleur et se visualise par une partie rougeoyante (voir figure 2.e). Ce phénomène peut être caractérisé par la résistance électrique du défaut dont la distribution statistique est représentée sur la figure 7. La valeur moyenne mesurée est d'environ $0,8 \Omega$, ce qui entraîne une dissipation de puissance moyenne de 76 W au sein du défaut.

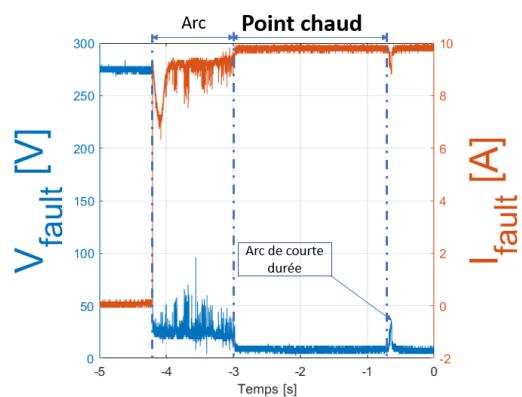


Figure 7. évolution des signaux électriques correspondant aux conditions d'essais: $V_{\text{alim}} = 270$ VDC, $P = 200$ hPa, cathode au centre. Phase de point chaud

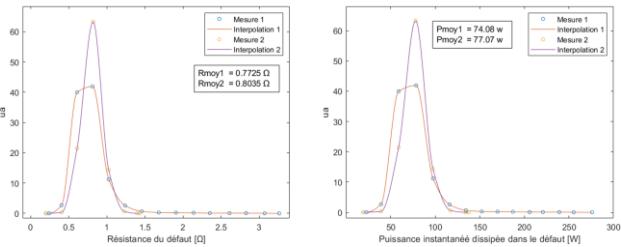


Figure 8.a.(à gauche) Distribution du résistance du défaut de point chaud
b.(à droite) Distribution de la puissance dissipée dans le défaut de point chaud

Il est intéressant de signaler que cette phase du point chaud peut être suivie d'arcs de courte durée, comme illustré dans la figure 7. Toutefois, cette phase tend généralement à évoluer vers des départs de feu et la destruction du système.

Dans la figure 9, les photographies des différents états finaux de l'évolution de notre défaut sont données. Les deux états présentés dans les figures 9.a et 9.b, respectivement le court-circuit et le départ de feu, ont déjà été observés comme conséquences des défauts d'arcs. La figure 9.c montre une conséquence originale : la disparition d'une partie de l'âme du câble central se traduisant par un circuit ouvert. Il est intéressant de noter que cela s'est produit après une heure de scintillations.



Figure 9. Etats finaux de l'évolution du défaut: a. Court circuit b. Feu c. Circuit ouvert

2.2. Discussion

Le phénomène de formation de mousse que nous avons observé a été également constaté dans les essais menés par Bruce et al. lorsqu'une tension de -2,25 kVDC a été appliquée entre les deux électrodes [7]. Ils ont observé la formation de mousse à la pointe de l'électrode connectée à la polarité négative. Cela a également été identifié par Ghunem et al [8] lorsqu'ils ont appliqué des tensions allant de -500 VDC à -1,75 kVDC entre les deux électrodes, en utilisant le même protocole d'essai. Ils ont remarqué la formation de mousse au niveau de la pointe de l'électrode connectée à la polarité négative également. Bruce et al. ont suggéré que la formation de mousse sur l'électrode négative pourrait être due à la présence d'hydrogène généré par l'électrolyse de l'électrode, ou à l'ébullition du contaminant sous l'effet Joule. Cependant, ils ont affirmé que la formation d'hydrogène gazeux en tant que sous-produit de l'électrolyse était plus probable. Nous ne pouvons-nous prononcer sur laquelle de ces deux hypothèses est la plus probable, mais ce n'est pas l'objectif de notre étude. Par ailleurs, Il est important de noter que dans notre étude, le phénomène de formation de mousse a été observé uniquement pour des tensions égales ou inférieures à 100 VDC, tandis que dans leur étude, il a été observé pour des tensions de l'ordre du kV.

Les scintillations ont été observées dans les travaux menés par P.L. Cahill [9], sur l'apparition d'« arc tracking » humide sur des câbles aéronautiques, pour des niveaux de tension de 220/110 VAC. Les résultats obtenus ont montré que lorsque le fluide s'évapore, des scintillations se forment à la surface des isolants. Les auteurs ont associé ces phénomènes au début de l'apparition de décharges de surface qui se produisent entre des

zones sèches en raison de l'effet Joule. Il convient de noter que, dans cette étude, aucune grandeur électrique n'a été mesurée, et l'accent a été principalement mis sur l'observation de l'état final du faisceau de câbles. De plus, ces phénomènes de scintillations ont également été mentionnés dans la littérature [1] [7], où ils ont été décrits comme des phénomènes de faibles énergies et associés à des décharges électriques surfaciques. Dans notre étude, les scintillations sont apparues à un niveau de tension bien inférieur à celui nécessaire pour qu'il s'agisse de décharges électriques.

Dans notre étude, nous avons montré que la durée des scintillations croît inversement avec la tension d'alimentation, tel que pour des tensions de 50V, la durée de scintillation peut aller jusqu'à 1h40minutes, alors que pour des tensions 100 VDC et 270 VDC cette phase ne dure pas plus de 20s. En comparant les essais effectués à 200hPa à ceux à pression atmosphérique, nous remarquons que les phases d'évolutions de défaut (scintillations, mousse, arc électrique, court-circuit, feu, etc...) sont similaires pour les deux pressions. Nous observons également que la tension d'alimentation exerce la même influence sur la durée des phases de scintillations et de mousse pour les deux pressions. Toutefois, une différence de comportement apparaît dans la chronologie des phases. À basse pression nous avons observé une plus grande imbrication entre les phénomènes de scintillations, de mousse et d'arc électrique par rapport aux observations à pression atmosphérique.

Le protocole utilisé dans cette étude présente certaines limitations qui nécessitent une analyse critique. Parmi celles-ci, il y a la salinité du liquide contaminant que nous avons imposée, ainsi que la fréquence de la tombée des gouttes et la géométrie du faisceau de câbles. Certes ces paramètres sont dérivés à partir d'une norme (AC NF EN 3475-605), mais ils peuvent ne pas refléter une situation réelle. Toutefois, il est intéressant de souligner que des essais supplémentaires ont été réalisés en utilisant de l'eau douce comme contaminant et en modifiant la fréquence de la tombée de la goutte, ainsi que la géométrie du faisceau de câbles. Ces essais ont révélé l'apparition de phénomènes précurseurs similaires, bien que des variations significatives aient été observées en termes de délais d'apparition et de durées des phénomènes.

3. CONCLUSIONS

L'étude des phénomènes précurseurs à l'apparition d'arc électrique effectuée pour les deux pressions (1atm, 200hPa), nous a permis de mettre en évidence la présence de deux phases qui précèdent l'apparition d'un arc : mousse et scintillations, ces phénomènes ont un caractère électrique discret, mais ils peuvent tout de même endommager le faisceau de câble ou son isolation. Ces travaux montrent également l'influence de la tension d'alimentation sur l'apparition et la durée de ces phénomènes, nous avons constaté que ces derniers apparaissent pour des tensions d'alimentation inférieures à 500 VDC, et leurs durées évoluent inversement à la tension d'alimentation sur la plage [50-500] VDC. Nous avons également observé une différence entre les deux pressions sur la chronologie des phases d'évolution du défaut, où nous avons constaté qu'à basse pression l'ordre des phases est beaucoup moins reproductible et qu'il peut même être réversible. Tous ces essais accentuent l'importance de la détection précoce de ces phénomènes qui n'entraînent pas de dégâts importants au début de leurs apparitions mais qui peuvent entraîner la destruction du système électrique s'ils persistent.

REFERENCES

- [1] J.-R. Riba, Á. Gómez-Pau, M. Moreno-Eguilaz, et S. Bogarra, « Arc Tracking Control in Insulation Systems for Aeronautic Applications: Challenges, Opportunities, and Research Needs », *Sensors*, vol. 20, n° 6, Art. n° 6, janv. 2020, doi: 10.3390/s20061654.
- [2] G. Robles, J. M. Martínez-Tarifa, M. Gómez-de-la-Calle, G. Barroso-de-María, et D. Izquierdo, « Detecting Serial Arcs in Aeronautical Applications Using Inductive Sensors », *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, n° 3, p. 2073-2082, juin 2022, doi: 10.1109/TAES.2021.3128868.
- [3] C. Vasile et C. Ioana, « Arc fault detection & localization by electromagnetic-acoustic remote sensing », oct. 2016, p. 1-2. doi: 10.1109/RADIO.2016.7772044.
- [4] F. Dricot et H. J. Reher, « Survey of arc tracking on aerospace cables and wires », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 1, n° 5, p. 896-903, oct. 1994, doi: 10.1109/94.326657.
- [5] T. André, F. Valensi, P. Teulet, Y. Cressault, T. Zink, et R. Caussé, « Arc tracking energy balance for copper and aluminum aeronautic cables », *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 825, n° 1, p. 012001, mars 2017, doi: 10.1088/1742-6596/825/1/012001.
- [6] B. Brusso, « History of Aircraft Wiring Arc-Fault Protection [History] », *undefined*, 2017, Consulté le: 28 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.semanticscholar.org/paper/History-of-Aircraft-Wiring-Arc-Fault-Protection-Brusso/e542bbbb9aea1f03644801c3e9b80fb4b8da07a3>
- [7] G. P. Bruce, S. M. Rowland, et A. Krivda, « Performance of silicone rubber in DC inclined plane tracking tests », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, n° 2, p. 521-532, avr. 2010, doi: 10.1109/TDEI.2010.5448108.
- [8] R. A. Ghunem, S. H. Jayaram, et E. A. Cherney, « The DC inclined-plane tracking and erosion test and the role of inorganic fillers in silicone rubber for DC insulation », *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 31, n° 1, p. 12-21, janv. 2015, doi: 10.1109/MEI.2015.6996674.
- [9] P. L. Cahill et J. H. Dailey, « Aircraft electrical wet-wire arc tracking », août 1988. Consulté le : 20 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1988faa..rept....C>
- [10] « Electrical Short Circuit/Arcing of Aged Aircraft Wiring », *yumpu.com*. <https://www.yumpu.com/en/document/read/51190294/electrical-short-circuit-arcing-of-aged-aircraft-wiring> (consulté le 23 mai 2023).
- [11] F. J. Campbell, « Flashover failures from wet wire arcing and tracking », *NASA STI/Recon Technical Report N*, vol. 85, p. 19332, déc. 1984.
- [12] F. R. Frontzek, D. Konig, M. D. Judd, et H. J. Reher, « Fault arc propagation on cables for space applications in vacuum, oxygen-enriched air and air », *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, vol. 2, n° 2, p. 190-197, 1995, doi: 10.1109/94.388239.
- [13] M. Boukhlifa, « Contribution à l'étude des arcs électriques sur réseau HVDC (540 VDC) en conditions aéronautiques », These de doctorat, université Paris-Saclay, 2021.