

JOURNAL INTERNATIONAL DE TECHNOLOGIE, DE L'INNOVATION,
DE LA PHYSIQUE, DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Analyse statistique des événements conséquents à un arc électrique amorcé par la présence d'un objet conducteur

A. Risacher, G. Belijar, L. Hermette



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.18145/jitipee.v3i1.151

Le sujet de cet article a été présenté oralement lors de la manifestation conjointe du colloque sur les arcs électriques et du workshop sur les arcs et contacts électriques (CAE-ACE) les 20 et 21 mars 2017 à Nancy (France).

L'article a fait l'objet d'une expertise indépendante par deux spécialistes du domaine.

Analyse statistique des événements conséquents à un arc électrique amorcé par la présence d'un objet conducteur

Aurore Risacher ⁽¹⁾, Guillaume Belijar ⁽¹⁾, Loïc Hermette ⁽¹⁾

⁽¹⁾ IRT Saint-Exupéry, 118 route de Narbonne, CS 44248, 31432 Toulouse cedex 4, France
aurore.risacher@irt-saintexupery.com

Résumé – Une analyse statistique est réalisée afin de déterminer les risques et les dommages provoqués par un arc électrique, engendré par la présence d'un objet entre deux pièces métalliques nues sous tension. La tension appliquée est de 400 Vrms à 400 Hz. Les mesures électriques sont corrélées à des observations par imagerie rapide afin d'associer les signaux électriques aux comportements de l'arc et de l'objet. Trois types d'événements ont été détectés à l'issue de la campagne d'essais : l'éjection de l'objet, le soudage d'un côté et des deux côtés de l'objet. En conclusion, nos mesures montrent que le type d'évènement dépend fortement du diamètre de l'objet.

Mots clés : arc électrique, FOD, amorçage

DOI : 10.18145/jitipee.v3i1.151

Introduction

L'évolution vers l'aéronef plus électrique [1,2] mène à l'augmentation de la tension du réseau avion et à la densification des équipements embarqués. Cette évolution favorise les risques d'apparition d'arcs électriques dans le réseau ou au sein des équipements. Ces arcs, dits de défaut [3], peuvent être à l'origine de dégradations ou d'incendies [4]. Pour cette raison, les professionnels du secteur aéronautique cherchent à détecter les arcs de défaut, à diminuer les dommages occasionnés par ces arcs et à se prémunir contre les causes des défauts. Une de ces causes est liée à la présence d'objets conducteurs, court-circuitant des pièces nues sous tension. Ces objets peuvent :

- soit être étranger au sous-système et tomber à l'intérieur. Ils sont alors appelés en anglais Foreign Object Debris ou encore FOD,
- soit être déjà présents à l'intérieur du sous-système. On parle alors de Domestic Object Debris en anglais ou encore DOD. Cela peut être une vis qui s'est desserrée à cause des vibrations de l'avion.

Ces objets peuvent également s'insérer dans un toron de câbles et détériorer l'isolant. De par leurs natures et géométries diverses (boulons, trombones, cosses...), il est difficile de se protéger de ces objets. L'impact de leurs tailles, de leurs natures et de leurs matériaux est à l'heure actuelle peu connu.

Il existe plusieurs moyens de se protéger des objets et de leurs conséquences : limiter l'accès des objets extérieurs aux équipements et perfectionner les organes de protection contre les arcs de défaut. Dans le premier cas, il faut déterminer les types d'objets susceptibles d'engendrer des dommages, afin de concevoir les protections adaptées comme par exemple des trous d'aération de diamètres adaptés. Dans le second cas, les organes de protection électrique nécessitent de détecter les signaux électriques conséquents au contact Objet-Conducteurs. Pour cela, il faut déterminer si ce contact présente une signature électrique particulière.

Pour répondre à ces deux points, une étude statistique est réalisée. Les différents événements consécutifs à la présence d'un objet entre deux électrodes sous tension sont étudiés en fonction du diamètre de l'objet. Les objets, la géométrie des électrodes, le circuit électrique ainsi que les moyens de mesures sont décrits dans la section 1. Les résultats de l'étude sont donnés et discutés dans la section 2.

1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans le cadre de ces essais est présenté en Figure 1. Les électrodes sont représentatives de barres de distribution électrique. Il s'agit de barres rectangulaires nues (sans isolant) en cuivre recouverte d'une fine couche d'argent. L'espace inter-électrode est fixé. La source électrique est une alimentation triphasée PACIFIC d'une puissance de 65 kVA. Une des barres est reliée à la phase A d'une alimentation triphasée, l'autre est connectée à la phase B. La tension entre phases est de 400 V à une fréquence de 400 Hz.

Une résistance de limitation est insérée entre l'alimentation et les électrodes. Le courant est mesuré au moyen d'une sonde de courant Hioki 3275 (de 500 A de courant maximum et de 2 MHz de bande passante). La tension est mesurée entre les bornes des électrodes par une sonde de tension différentielle HZ-115 de chez Hameg (20 MHz de bande passante). Les signaux électriques mesurés sont enregistrés grâce à un oscilloscope Hioki 8847 dont la grande capacité temporelle permet d'enregistrer des signaux d'arcs sur une longue durée, par exemple, pendant 1,6 s, la période d'échantillonnage est de 100 ns. Des signatures électriques ont ainsi pu être enregistrées correspondant à des événements consécutifs à la présence d'objets conducteurs entre les électrodes lors de leurs mises sous tension. Les résultats sont présentés dans la section suivante.

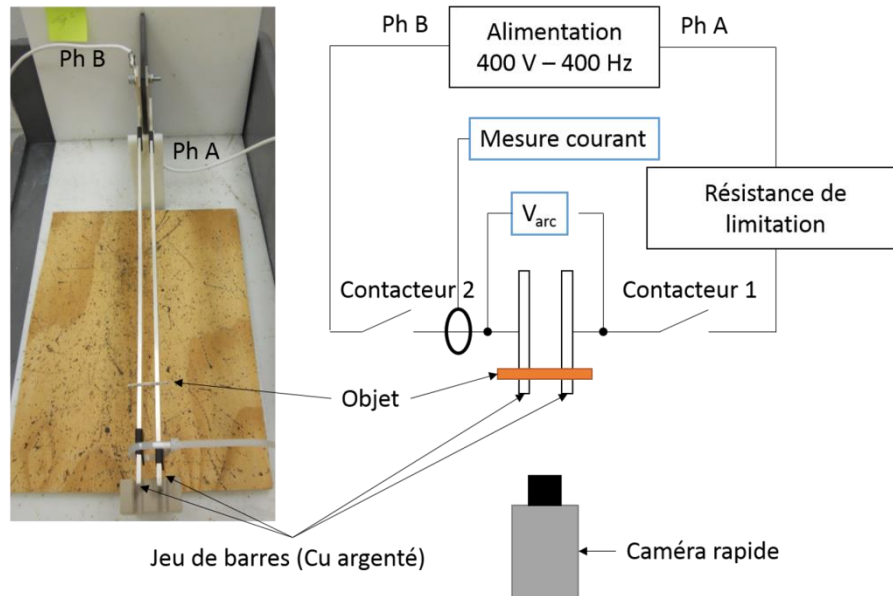


Figure 1. Dispositif expérimental, (à gauche) photo du montage avec objet posé, (à droite) synoptique du circuit électrique et des moyens d'acquisition

Les types d'objets (FOD et DOD) dans un avion étant très variés, le choix s'est porté sur des âmes de câble aéronautique multibrins de cuivre nickelé de marque Draka. Cela permet de contrôler aisément les paramètres géométriques, ici la longueur est fixée, et le diamètre varie. Les différents diamètres testés sont listés dans le Tableau 1.

Type de câble	Nature de l'âme	Diamètre Ø du câble (mm)
DR08	Cuivre Nickelé	3,74
DR10	Cuivre Nickelé	2,74
DR14	Cuivre Nickelé	1,69
DR16	Cuivre Nickelé	1,42
DR18	Cuivre Nickelé	1,22
DR20	Cuivre Nickelé	0,95
1 brin de DR08	Cuivre Nickelé	0,3

Tableau 1. Liste des objets représentatifs des FOD et DOD

Les objets sont posés sur les électrodes avant la mise sous tension. Chaque essai comprend des observations à priori et à posteriori de la position de l'objet, une mesure de la tension et du courant, et une acquisition en imagerie rapide avec une caméra Photron SA4.

Pour chaque type d'objet au moins 5 essais ont été réalisés pour obtenir un aperçu du comportement pour un jeu de paramètres donnés. Cela correspond à plus de 230 essais.

2. Résultats de test et discussions

À la suite de la campagne d'essais, trois types d'évènement ont été identifiés : l'éjection de l'objet, le soudage de l'objet sur une ou deux barres. Les signatures électriques associées à ces évènements ainsi que les images de l'arc électrique correspondant, acquises grâce à une caméra rapide (20 000 images/s), peuvent être observées dans les 3 prochaines figures.

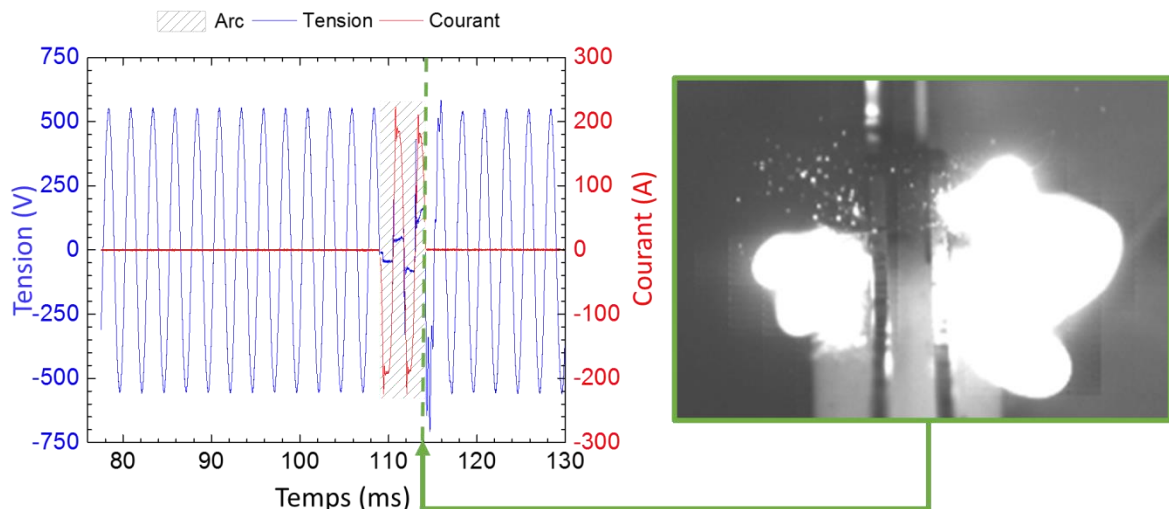


Figure 2. Signaux électriques caractéristiques d'une éjection de l'objet ($\varnothing = 0,95$ mm) et illustration photographique correspondantes. Pour cet exemple, la durée de l'arc est de 5,1 ms.

Dans le premier cas, présenté en Figure 2, l'objet est éjecté. Pour les petits diamètres l'objet est éjecté très rapidement, un arc se forme alors entre chaque extrémité de l'objet et les électrodes. Plus l'objet s'éloigne des électrodes, plus les arcs qui se trouvent à chacun de ses côtés s'allongent. De fait, la tension mesurée aux bornes des électrodes augmente [5,6]. Pour des diamètres légèrement supérieurs, l'objet peut n'être que partiellement éjecté et rebondir sur les barres, amorçant alors plusieurs arcs consécutifs.

Le développement des arcs peut suivre différents comportements :

- L'objet est complètement éjecté et les deux arcs se rejoignent pour n'en former qu'un. L'arc peut alors continuer à vivre jusqu'à une extinction manuelle. Ce cas n'est pas souvent observé.
- L'objet s'éloigne tellement que la tension aux bornes des électrodes dépasse ce que peut délivrer l'alimentation, l'arc s'éteint.
- Les arcs s'allongent mais le passage du courant par 0 favorise leurs extinctions.
- Les arcs s'allongent, la tension augmente, la limite en puissance de l'alimentation est atteinte, le courant diminue alors jusqu'à l'extinction des arcs.

Dans le second cas, présenté en Figure 3, l'objet est soudé d'un côté. Ce cas est observé pour les objets de diamètres intermédiaires. Il est au départ légèrement soulevé, un arc se développe entre les extrémités de l'objet et les électrodes. Lorsqu'il retombe sur les électrodes, il se soude d'un côté. De l'autre, puisque l'objet n'est pas en contact avec les électrodes, un arc électrique se développe.

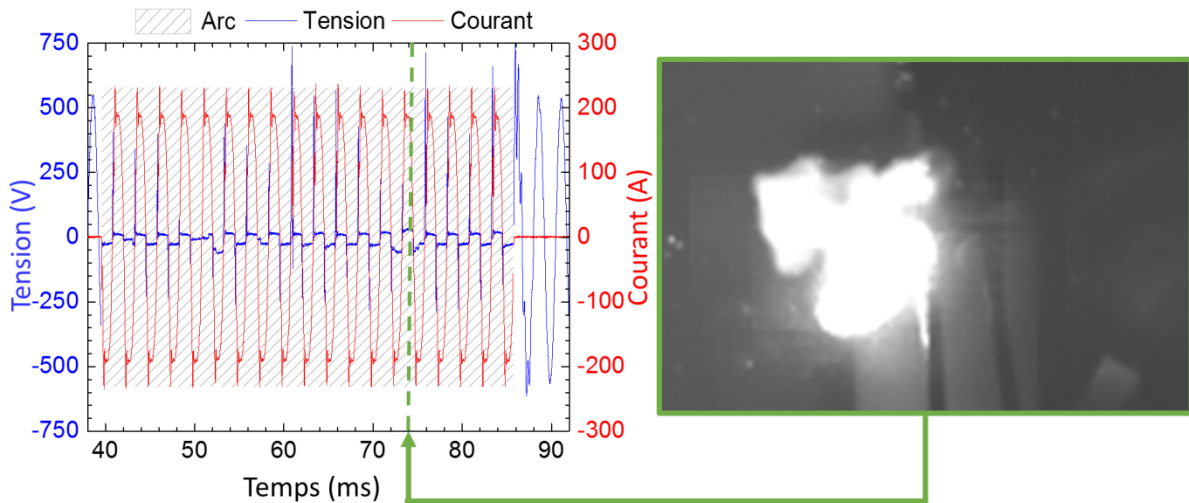


Figure 3. Signaux électriques caractéristiques d'un objet soudé d'un côté ($\varnothing = 1,42$ mm) et illustration photographique correspondantes. Pour cet exemple, la durée de l'arc est de 46 ms.

Le mécanisme menant à l'extinction n'est pas actuellement compris, en effet, les conditions semblent favorables à la vie de l'arc. On suppose que les comportements mécaniques de l'objet jouent un rôle dans ce mécanisme. Cependant, les réglages actuels (20 000 image/s, temps de pose de 1/30 000 s, filtre neutre atténuateur de transmittance 1/400) de la caméra ne permettent pas d'observer l'objet pendant tout l'enregistrement. En effet, ces réglages sont choisis afin de ne pas saturer le capteur et de pouvoir observer l'arc électrique. Ainsi, l'objet n'est observable que lorsque qu'il est éclairé par l'arc électrique mais pas lorsque celui-ci s'éteint. Des observations du comportement mécanique de l'objet avec une autre caméra permettraient, peut-être, d'obtenir plus d'informations sur ce mécanisme d'extinction. Pour cela, la seconde caméra aurait les réglages adaptés pour observer l'objet pendant les phases où la luminosité est trop faible pour que l'objet puisse être visible.

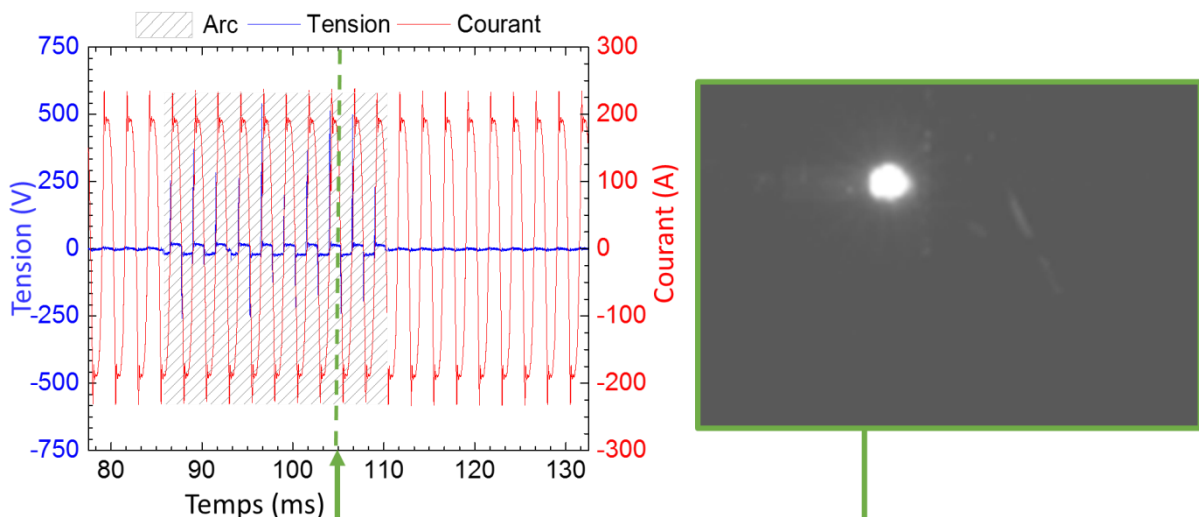


Figure 4. Signaux électriques caractéristiques d'un objet soudé des deux côtés ($\varnothing = 3,74$ mm) et illustration photographique correspondantes. Pour cet exemple, la durée de l'arc est de 24 ms.

Dans le troisième cas, présenté en Figure 4, l'objet est soudé des deux côtés. Ce cas correspond aux objets de plus grands diamètres. En général, deux arcs sont amorcées au départ, l'objet se soude ensuite d'un ou des deux côtés. Si l'objet n'est soudé que d'un côté, d'autres arcs s'amorcent jusqu'au soudage et la mise en court-circuit des barres.

À partir de tous les essais réalisés (au moins 5 essais par configuration), une probabilité d'occurrence a été réalisée. Elle donne la probabilité qu'un évènement décrit ci-dessus se produise lors de la mise sous tension des électrodes. Ainsi, lorsque la probabilité est de 100%, cela signifie que, pour tous les essais réalisés dans la configuration choisie, l'évènement associé s'est produit à chaque fois. La Figure 5 résume cette probabilité.

On observe ainsi que les objets de petits diamètres ($\varnothing=0,3-0,95$ mm) sont éjectés à chaque essai. Lorsque le diamètre augmente ($\varnothing=1,22-1,42$ mm), on observe la transition entre l'objet éjecté et soudé d'un côté à une des électrodes. Pour $\varnothing=1,22$ mm, l'objet est plus souvent éjecté que soudé. Inversement pour un diamètre plus grand, $\varnothing=1,42$ mm, l'objet est plus souvent soudé d'un côté qu'éjecté. Pour un diamètre de 1,69 mm, le fil est soudé d'un côté à chaque test.

Quand le diamètre continue d'être augmenté, un autre recouvrement d'évènements est observé : soudé d'un côté et soudé des deux côtés pour $\varnothing=2,74$ mm. Pour $\varnothing=3,74$ mm, l'objet est uniquement soudé des deux côtés. Il semblerait ainsi que les évènements soient fonction du diamètre des câbles choisis pour représenter les FOD et DOD dans notre étude, avec une transition entre chaque évènement où les évènements consécutifs se recouvrent.

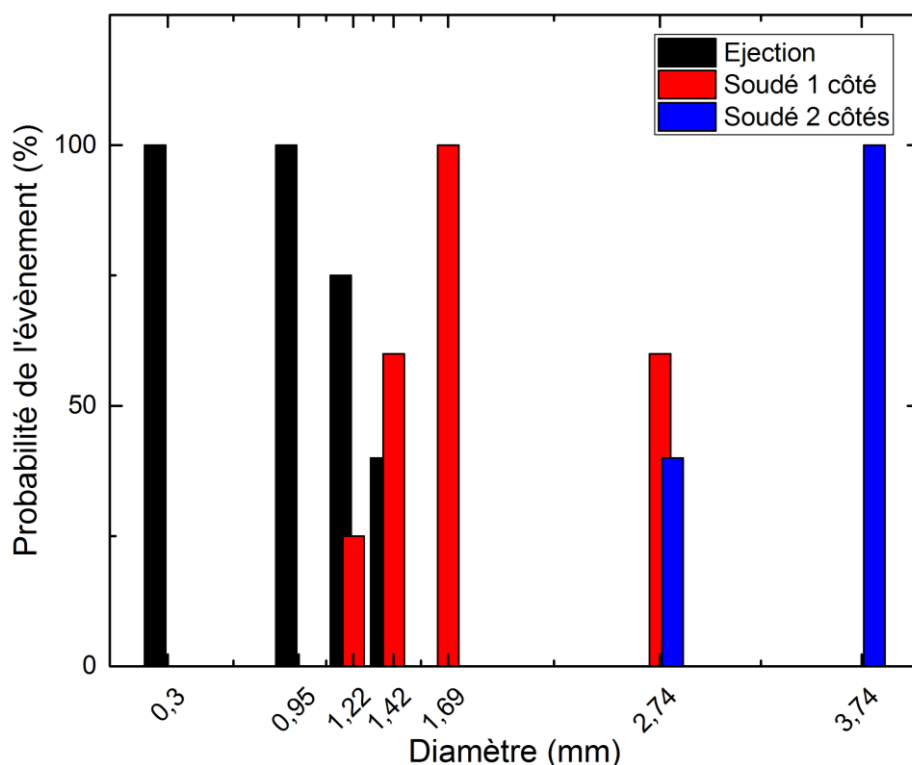


Figure 5. Probabilité d'occurrence des différents évènements en fonction des diamètres des Objets

Il n'est pas possible avec l'étude actuelle de déterminer le(s) paramètre(s) qui gèrent le comportement de l'objet. En effet, lorsque l'on fait varier le diamètre de l'objet, d'autres paramètres varient aussi tels que la masse, la résistance de contact, résistance de l'objet, dissipation thermique etc. Cependant, nous avons de fortes présomptions quant à l'impact de la masse de l'objet, ceci sera vérifié ultérieurement.

Conclusion et perspectives

Une étude statistique du comportement d'un système en présence d'objets statiques a été effectuée. A l'issue de cette étude, des premières pistes permettant de discriminer l'apparition de arcs en fonction de la géométrie de l'objet ont été investigués. Les résultats ont permis d'observer une forte corrélation entre le diamètre de l'objet et les événements électriques, ce qui pourra servir à établir des guides de conception de protection des systèmes aéronautiques. Cette étude sera complétée ultérieurement par une étude de l'impact de la nature de FOD ou DOD (cuivre, aluminium, acier) et une étude dynamique où les objets seront lâchés au-dessus des électrodes.

Références

- [1] Langlois O., Foch E., Roboam X., et Piquet H. (2005), De l'avion plus électrique à l'avion tout électrique: état de l'art et prospective sur les réseaux de bord, J3eA 4, hors-série 1, Doi : 10.1051/bib-j3ea:2005601
- [2] Weimer J. A. (1993), Electrical power technology for the more electric aircraft, Digital Avionics Systems Conference, 12th DASC, Doi : 10.1109/DASC.1993.283509
- [3] El-Bayda H. (2012), Étude du transfert d'énergie entre un arc de court-circuit et son environnement : application à l'«ArcTracking», Toulouse: Thèse Université Paul Sabatier
- [4] Babrauskas V. (2001), How do electrical wiring faults lead to structure ignitions, Proc. Fire and Materials, Conf. 2001
- [5] Vacquié S., Arc électrique, Technique de l'Ingénieur, D2870
- [6] Pellerin S., Cormier J.-M., Richard F., Musiol K. and Chapelle J. (1999), Determination of the electrical parameters of a bi-dimensional dc Glidarc, Journal of Physics D: Applied Physics, Doi : 0022-3727/32/i=8/a=009