



Reproduire en laboratoire le foudroiement dynamique des avions

Etude expérimentale du phénomène de balayage de l'arc électrique

Vincent Andraud

Docteur en Génie Electrique,
Lauréat du prix de thèse Ampère-SEE 2023

Attaché de recherche à l'institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL)

Lors du foudroiement des aéronefs, le point d'impact de foudre peut se mouvoir librement sur la surface de l'appareil. Afin de comprendre ce mouvement et ainsi optimiser les protections aéronautiques, une expérience de foudroiement dynamique d'échantillons aéronautiques est reproduite et instrumentée en laboratoire. Cette étude est rendue possible grâce à la réalisation d'un générateur électrique de foudre et d'un lanceur électromagnétique de conceptions originales.

Introduction

Le secteur aéronautique s'étant engagé à diviser par deux ses émissions en carbone pour 2050, une des stratégies mises en œuvre actuellement est le remplacement du métal recouvrant les avions (fuselage et ailes) par des matériaux composites beaucoup plus légers. Ces matériaux constituant par exemple 50 % du poids des Boeing

787 Dreamliner et Airbus A350XWB, on peut atteindre une réduction totale de 25 % du poids de ces aéronefs.

Cependant, ce remplacement est en grande partie limité par le risque de foudroiement. Ce risque est pris en compte dès la conception de l'avion puisque le phénomène se produit statistiquement toutes les 1000 à 10000 heures de vol,

soit environ une ou deux fois par an. Les dommages causés aux aéronefs par la foudre se présentent sous la forme de points d'impacts - appelés pieds d'arc - ancrés sur le revêtement ou de trous dans le fuselage. Les composites en fibres de carbone y sont plus vulnérables que les métaux car leurs conductivités thermique et électrique plus faibles ne permettent pas une répartition équilibrée des dégâts sur la

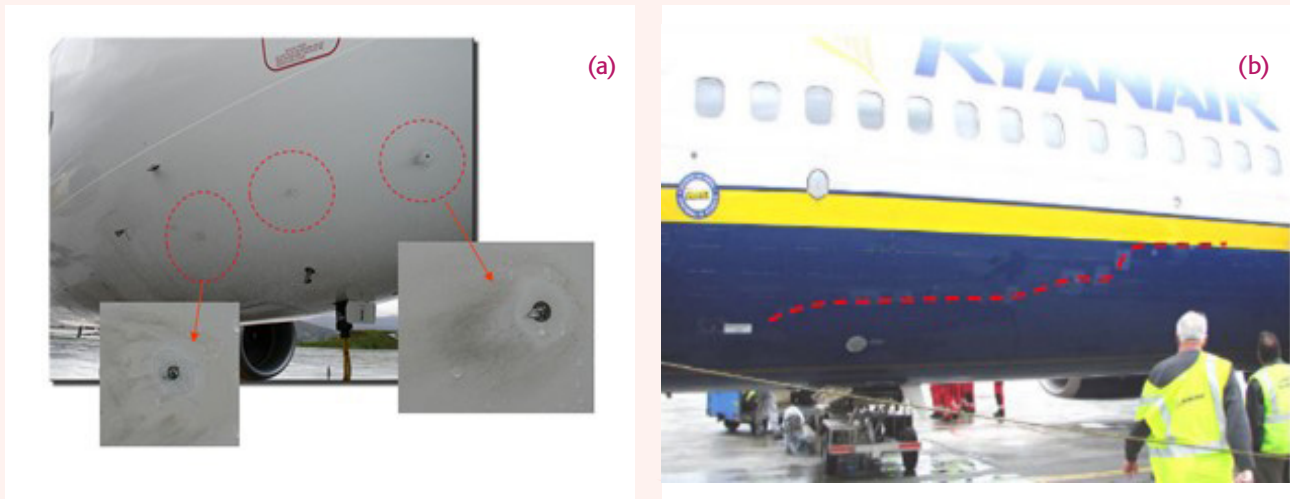


Figure 1 : Images d'un balayage discontinu sur fuselage d'un avion A320 (a), et d'un balayage continu sur un fuselage d'un avion B737 (b) - Source A. Plumer (2012).

totalité de la structure de l'avion. L'emploi de ces matériaux n'est alors raisonnable qu'avec une protection métallique adaptée.

Des codes de simulations ont été développés pour prévoir les localisations de points d'impacts de la foudre afin de les protéger. Mais cette prédiction est d'autant plus compliquée à réaliser que, du fait du mouvement relatif entre la foudre et l'aéronef, le point d'impact peut se déplacer sur toute la surface de l'avion. Ce déplacement est appelé le « balayage » de l'arc. Le déplacement peut être soit continu avec le glissement du pied d'arc le long de l'aéronef, soit discontinu avec le saut des pieds d'arcs comme illustré en figure 1 [1].

Ainsi, des treillis métalliques ont été conçus et testés expérimentalement pour la certification foudre, ce qui a augmenté les coûts et les délais de fabrication. À l'avenir, cette phase de conception et de test de la protection foudre pourrait être accélérée grâce à une compréhension plus approfondie des processus physiques intervenant lors du balayage. Au cours des dernières décennies, de nombreux modèles de simulation ont été développés pour prédire le comportement de l'arc de foudre et ainsi concevoir des protections plus précises. Cependant, aucune mesure expérimentale significative du phénomène n'a produit de caractérisation physique fine destinée à fournir des données d'entrée ou de comparaison avec les résultats des simulations pour leur validation.

“ Les dommages causés aux aéronefs par la foudre se présentent sous la forme de points d'impacts - appelés pieds d'arc - ancrés sur le revêtement ou de trous dans le fuselage. ”

Pour répondre à ce défi, nous avons proposé une expérience inédite de reproduction du balayage en laboratoire qui comprend la réalisation d'un générateur de foudre, celle d'un lanceur électromagnétique et leur couplage pour proposer des résultats scientifiques originaux participant à la compréhension du phénomène.

Conception et implémentation d'un générateur de foudre à courant régulé

Modèle électrique d'un arc de foudre de balayage

Notre premier objectif a été de réaliser un générateur électrique capable de créer des arcs de foudre représentatifs du phénomène de balayage. Il nous a donc fallu décrire les propriétés électriques de l'arc balayé à partir de la littérature afin de concevoir un générateur électrique adapté.

Du fait de la fréquence du risque foudre, les autorités de certification civile aéronautique (EASA, FAA) ont instauré des recommandations pour les protections foudre. Il est ainsi établi que l'onde de

foudre responsable du phénomène de balayage est une onde de courant à amplitude constante – de l'ordre de quelques centaines d'ampères pouvant durer 50 ms (onde C*). Comme le foudroiement des aéronefs a lieu plus de 9 fois sur 10 au décollage ou à l'atterrissage – le pilote d'avion pouvant facilement éviter une zone de nuages de foudres en altitude de croisière – sa vitesse est de l'ordre de 100 m/s et la pression est peu différente de la pression au sol. Une expérience en laboratoire est donc représentative du phénomène à basse altitude. Il est d'ailleurs part accepté que le balayage met uniquement en jeu le canal de foudre situé à proximité de l'aéronef même si ce canal peut atteindre quelques dizaines de kilomètres. Cependant, si l'on considère le phénomène du balayage, l'arc va naturellement s'étirer et le générateur électrique devra être capable de fournir cette énergie supplémentaire. Dans le cas où l'arc s'étirerait indéfiniment sans rattachement pour une durée de l'onde C* de 50 ms et une vitesse de l'aéronef de quelques dizaines à une centaine de m/s, l'arc pourrait atteindre une taille maximale de l'ordre du mètre. Ainsi le générateur devra être capable d'alimenter en énergie un arc élec- ●●●

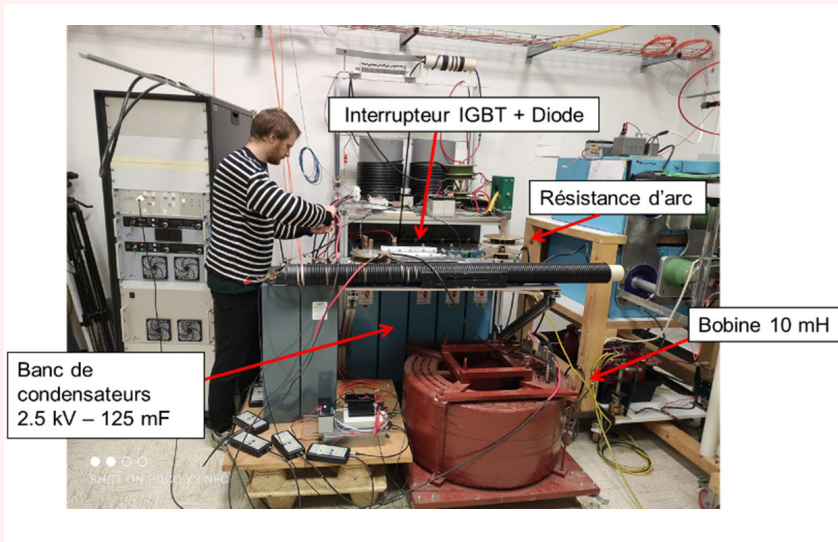


Figure 2 : Assemblage du générateur de foudre haute-puissance.

●●● trique avec une intensité constante d'une valeur entre 200 et 800 A, une taille de l'ordre de 1 m et une durée de vie de 50 ms.

D'après la littérature, un arc est modélisable électriquement par une résistance pour de telles intensités de courant, ses effets capacitifs et inductifs étant négligeables. Cette résistance s'élève à 4 Ω /m pour un arc de 400 A.

Conception et réalisation du générateur de foudre

Ainsi le générateur électrique devra être capable de fournir un courant constant de 400 A (par la suite ce courant sera modulable de 200 à 800 A) à travers une résistance variable de valeur moyenne de 4 Ω pour simuler un arc d'un mètre. Or un courant de 400 A et une charge de 4 Ω représentent une puissance de 1,3 MW qui n'est pas directement disponible sur le réseau électrique du laboratoire. Il faut donc choisir un système de stockage d'énergie électrique adapté. En comparant des technologies de batterie, de volant d'inertie, de stockage inductif et de stockage capacitif, il semble que le stockage capacitif soit l'option la plus simple, la plus sécurisée et la plus économique. Un banc de condensateur est alors dimensionné : il s'agit d'un banc de tension maximale 2,5 kV et de capacitance 125 mF.

De plus, le courant délivré doit être régulé. Il faut donc adapter une topologie de circuit électrique capable, à partir d'un banc de condensateur, de délivrer un courant quasi-continu. Nos simulations ont établi que le circuit convertisseur DC/DC de type Buck serait adapté à notre banc. La régulation du courant est permise grâce à un circuit secondaire électronique d'asservissement.

Le circuit électrique haute tension est représenté en figure 2. Il est composé d'un banc de condensateurs de 125 mF, d'une bobine de 10 mH, d'un ensemble de diodes, d'IGBT et de condensateurs de snubber de 5 mF.

Le générateur délivre ainsi une onde de courant avec une intensité de courant de 400 A avec des variations inférieures à 10 % et pour une durée de plus de 50 ms. Avec cette topologie, des arcs pouvant atteindre une taille jusqu'à 1,5 m et respectant la norme C* ont pu être générés [2]. La photo d'un arc électrique de 1,5 m obtenue avec une caméra rapide filtrée est donnée figure 3.

Il faut maintenant mettre ces arcs en mouvement pour reproduire expérimentalement le phénomène de balayage.

Développement d'un « Railgun » basse tension dans le contexte du balayage

Choix de la technologie de propulsion : le Railgun

Notre deuxième objectif est de simuler expérimentalement le déplacement d'un aéronef à une vitesse dans la gamme 20 m/s - 100 m/s, ce qui correspond à la vitesse d'un avion au décollage ou à l'atterrissage. Afin de faciliter la mise en place de diagnostics optiques et électriques de précision, il est préférable de reproduire cette expérience en intérieur. Or, les dimensions du laboratoire limitent la longueur d'accélération d'échantillons aéronautiques à seulement quelques mètres, ce qui représente

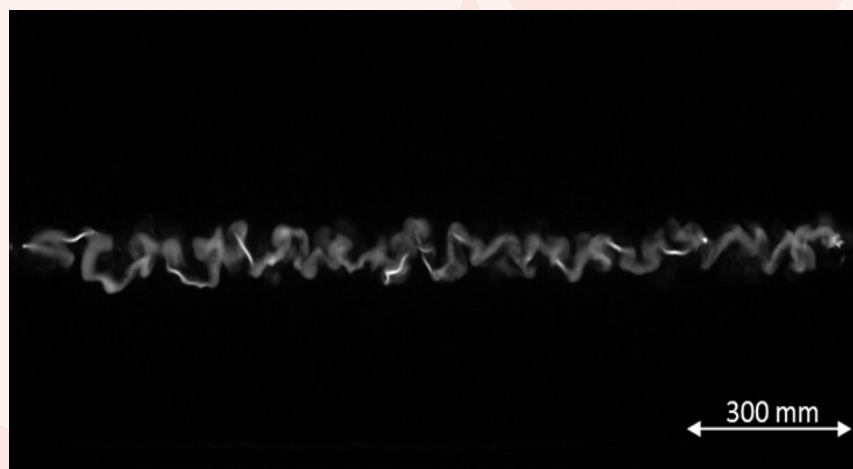


Figure 3 : Image d'un arc électrique issu de l'onde C* de 1,5 mètre. L'arc présente des tortuosités dues à des forces magnétiques auto-induites. Après une phase initiale de quelques ms qui correspond à la fusion du fil d'amorçage et à la stabilisation du plasma d'arc, la régulation maintient le courant à 400 A pendant 90 ms jusqu'à l'extinction provoquée de l'arc.

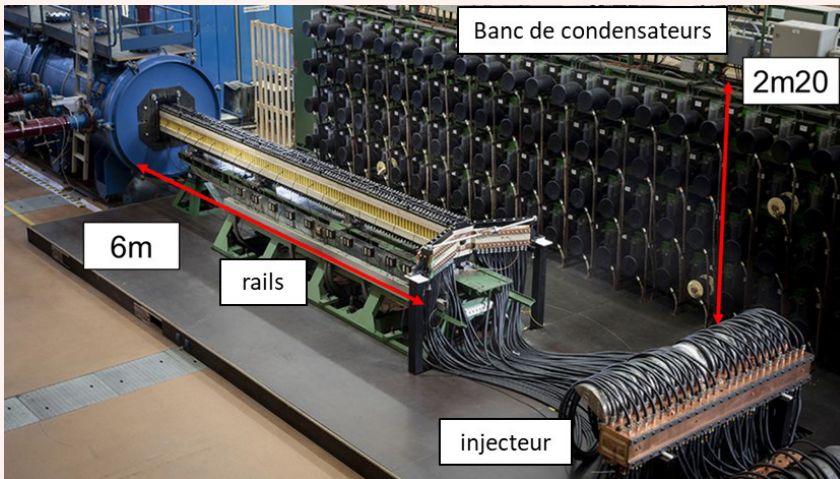


Figure 4 : Photo du lanceur à rail de 6 m NGL-60 et de sa source d'énergie composée de 200 condensateurs (source ISL).

“ La technologie Railgun est un sujet à la pointe de la recherche qui, en Europe, est développé à l’institut franco-allemand de Saint-Louis (ISL). ”

une accélération colossale de plusieurs centaines de g. Les échantillons envisagés sont des plaques d'aluminium aéronautique avec une longueur comprise entre 20 et 40 cm et une masse entre 100 et 300 g. Ainsi, si l'on considère une technologie de propulseur, il faudrait qu'elle exerce une force moyenne de 500 N pendant 50 ms sur l'échantillon.

Après la comparaison de différentes technologies de lanceurs à propulsion solide, liquide, gazeuse et électromagnétique, l'option retenue a été de construire un lanceur électromagnétique de type Railgun pour des raisons de performances théoriques, de coût, de sécurité et de faisabilité dans un laboratoire d'électronique de puissance.

Le principe physique d'un Railgun est simple : si l'on considère deux rails métalliques au milieu desquels est inséré un projectile conducteur et que l'on insère un courant élevé dans ce montage, ce courant va produire un champ magnétique qui va interagir avec ce même courant pour délivrer une force de propulsion de Laplace. Ce principe fonctionne si tout au long de l'accélération, le projectile maintient un bon

contact électrique avec les rails – on parle de contact glissant.

La technologie Railgun est un sujet à la pointe de la recherche qui, en Europe, est développé à l'institut franco-allemand de Saint-Louis (ISL). Par exemple, le lanceur NGL-60, décrit en figure 4, permet d'envoyer des pièces métalliques avec une masse de 1 kg à des vitesses dépassant Mach 6 (de l'ordre de quelques km/s). Pour obtenir de telles performances, une énergie électrique importante (quelques 10 MJ) et une puissance électrique colossale (de l'ordre de quelques GW) doivent être fournis [3]. La force de propulsion étant proportionnelle au carré du courant délivré, les niveaux de courants atteints dans la littérature sont de l'ordre de quelques MA et sont limités notamment par des contraintes mécaniques et thermiques sur les matériaux.

Dimensionnement et implémentation d'un Railgun basse tension

Pour notre application, il est inenvisageable de construire un banc de 10 MJ.

Cependant, il n'est pas nécessaire d'obtenir une vitesse finale de l'ordre du km/s. Ainsi, nous pouvons minimiser la source d'énergie afin d'obtenir une vitesse de 100 m/s avec le niveau de courant le plus faible possible. De plus, il est souhaitable de travailler avec une tension de la source d'énergie la plus faible possible pour éviter des dangers électrotechniques : en effet, le Railgun sera couplé avec le générateur de foudre haute tension pour reproduire le balayage. Ainsi, pour notre application, un courant constant d'environ 30 kA fourni pendant 50 ms permettrait d'obtenir une force constante de 500 N pour quelques mètres d'accélération. Si l'on parvenait à réaliser un circuit avec une résistance totale de 1 mΩ, le niveau de tension nécessaire pour obtenir 30 kA s'abaisserait à 30 V, ce qui serait compatible avec un couplage au générateur de foudre en termes de sécurité électrique.

Cependant, à 30 kA, il n'existe pas de technologie de commutateur qui permette une bonne régulation de courant. Il faut donc que le temps électrique de décharge du circuit passif soit dix fois supérieur au temps d'injection du courant pour obtenir un courant constant. Un stockage inductif est inenvisageable car l'ajout d'une bobine serait trop résistif pour notre application : nous devons donc envisager un stockage capacitif. Il faut donc que le produit RC (le temps électrique du circuit) soit supérieur à 500 ms. Avec une résistance de circuit de 1 mΩ, cela implique d'avoir un banc de condensateurs avec une capacité équivalente de 500 F. Cette valeur peut être atteinte à l'aide de la technologie des supercondensateurs. Les modèles les plus performants ont une capacité de plus de 3000 F. Cependant ils ne peuvent être chargés au-dessus de 3 V ce qui nécessite une mise en parallèle et en série de plusieurs pièces pour obtenir les 30 V nécessaires avec une capacité de plus de 500 F.

La figure 5 présente le Railgun original développé à partir de ce dimensionnement. Il est composé de rails en cuivre de 2,5 m et d'une source d'énergie à base de supercondensateurs.



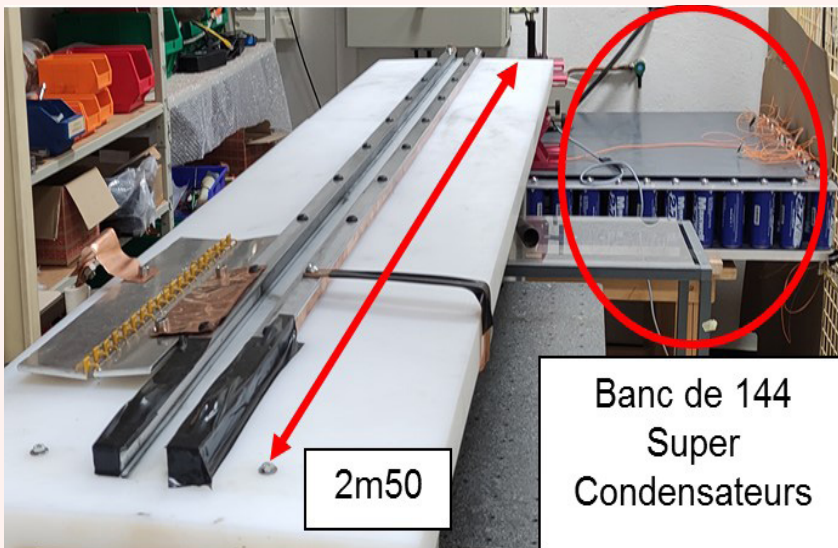


Figure 5 : Assemblage final du montage Railgun. Des aimants permanents de type NdFeB sont insérés tout au long de la piste d'accélération de l'armature dans le support en plastique pour augmenter le champ magnétique.

●●● Avec le Railgun développé, des projectiles avec une masse comprise entre 45 g et 210 g sont envoyés à des vitesses entre 60 et 120 m/s sur 2,5 m d'accélération avec une déviation standard de 5 % [4]. Notre équipement de propulsion permet donc de produire les performances visées pour étudier le balayage.

Etude expérimentale du phénomène de balayage à partir des instruments développés

Couplage du générateur de foudre et du Railgun pour reproduire le balayage

Nous pouvons maintenant coupler le générateur et le lanceur pour recréer en laboratoire le phénomène de balayage. Les électrodes du générateur de foudre sont placées après la sortie des rails. Le projectile est constitué d'une armature conductrice sur laquelle est monté l'échantillon aéronautique à étudier. Pour obtenir de premiers résultats facilement exploitables, l'étude n'est menée que sur un échantillon en aluminium. Un profil NACA 12, largement employé dans le milieu aéronautique, est utilisé car il stabilise l'écoulement d'air lors d'une accélération. Le banc d'essais développé permet de tirer à une fréquence de l'ordre d'un tir toutes les

dix minutes, ce qui permet de mener des campagnes quantitatives.

Lors de la séquence d'un essai de balayage, l'armature placée entre les rails du lanceur est solidaire de l'échantillon grâce à une tige filetée isolante. Lorsque le courant est injecté dans les rails et l'armature, la force de Laplace résultante provoque la propulsion de l'ensemble du projectile. Le générateur de foudre est alors synchronisé pour former un arc avant son arrivée. A la sortie des rails, l'arc s'attache sur l'échantillon, formant un premier point d'impact ou pied d'arc, précurseur du phénomène de balayage étudié. Un fil électrique relie l'échantillon et une des électrodes de l'arc afin d'éviter la formation d'un second arc. Les images d'un balayage avec l'équipement Railgun obtenues par caméra rapide avec filtre sont présentées en figure 6.

Caractérisation électrique et optique du phénomène de balayage

Maintenant que les deux modes de production du phénomène de balayage ont été implémentés avec succès, nous pouvons conduire une étude en faisant varier les paramètres de l'expérience et en nous intéressant aux grandeurs mesurables qui nous permettront de mettre en place une base de données expérimentale du phénomène. Les différents paramètres de

l'étude sont : le mode de déplacement relatif arc/échantillon pour le balayage (Railgun ou soufflerie), la polarité de l'échantillon (anode ou cathode), la vitesse du projectile (Railgun) ou de l'écoulement d'air (soufflerie), l'intensité du courant d'arc, les dimensions de l'échantillon et la distance initiale entre les électrodes.

A partir des mesures électriques (sondes de courant et tension) et optiques (imagerie par caméra rapide et spectroscopie), nous avons pu décrire le comportement hydrodynamique et thermodynamique de la colonne d'arc lors du balayage [5] et nous avons pu suivre la dynamique de déplacement du pied d'arc sur l'échantillon [6].

Les résultats expérimentaux les plus notables sont obtenus pour la polarité de l'échantillon. En effet, si *a priori*, elle n'a

L'auteur

Vincent Andraud a obtenu son diplôme d'ingénieur CentraleSupélec, spécialité énergie, en 2018 et son doctorat en Génie élec-



trique de l'université Paris-Saclay en 2022 pour ses travaux de thèse effectués à l'ONERA et au GeePs sur le sujet expérimental du foudroiement des avions. Ses domaines de recherche sont alors les générateurs et les arcs électriques. Ses activités développées pendant la thèse ont été prolongées grâce à l'obtention d'une bourse MISTI allouée par le Massachusetts Institute of Technology (MIT). Il travaille désormais à l'Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (ISL) sur les technologies de lanceurs électromagnétiques et de puissance pulsée.

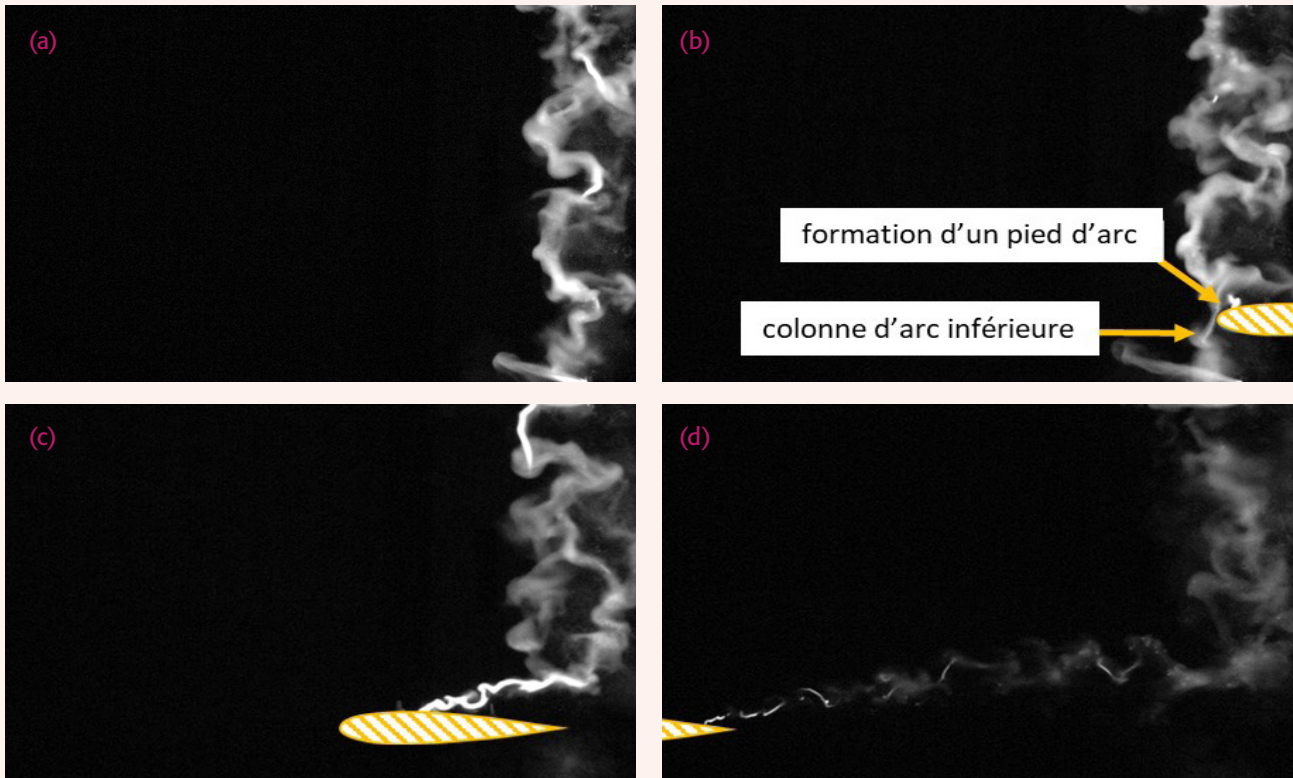


Figure 6 : Images successives du comportement hydrodynamique de la colonne d'arc pendant le balayage avec la configuration Railgun : formation de l'arc (a), arrivée du projectile et premier impact (b), balayage (c) et extinction de l'arc (d).

pas d'influence sur le comportement de la colonne d'arc, elle joue un rôle prédominant pour la dynamique du pied d'arc. Ainsi, avec un pied d'arc cathodique, on observe un mouvement continu ou continu par sauts – le pied d'arc semble glisser sur la surface de l'échantillon. Alors qu'avec un échantillon anodique, le pied d'arc ne se déplace uniquement que par sauts.

En regardant dans la littérature, cette différence de comportement est déjà observée pour des arcs de quelques dizaines de mm et de quelques cm et pourrait s'expliquer par la différence de mécanismes d'émission électronique et ionique entre une cathode et une anode pour l'aluminium. Ainsi, une cathode peut émettre des électrons grâce à des mécanismes d'émission thermo-ionique et par effet de champ : des points plus chauds et présentant un champ électrique local plus intense vont être plus favorisés pour devenir de nouveaux sites d'émission d'électrons et donc accueillir le pied d'arc. De tels points sont plus probablement situés au voisinage immédiat du pied d'arc ; celui-ci diffuse en effet de la chaleur à son voisinage car il subit un effet

Joule important due à sa forte densité de courant et crée un champ électrique renforcé localement à cause de son émission électronique. Ainsi le pied d'arc peut se déplacer de proche en proche sur la surface de l'échantillon, créant un mouvement continu. Ce mouvement du pied d'arc vient donc influencer le mouvement de balayage : d'une part la colonne d'arc a tendance à se réattacher pour minimiser son extension mais elle est freinée d'autre part par le mode de déplacement continu favorisé du pied cathodique.

Ces mécanismes d'émission n'agissent pas ou ne sont pas prédominants pour le pied d'arc anodique face à la nécessité de l'arc de réduire son énergie en minimisant sa longueur : un pied d'arc peut être formé de manière plus aléatoire sur le matériau avec peu d'influence de l'emplacement d'un autre pied d'arc ; par ailleurs on observe que plusieurs pieds d'arc peuvent exister, conduisant à une ramification très locale de la colonne d'arc. Ainsi le mouvement observé du pied anodique est un mouvement par saut ou discontinu. Cette différence qualitative de comportement est

mise en évidence sur la figure 7. Ces phénomènes sont cependant plus complexes dans la réalité avec l'ajout d'une couche de peinture ou la présence de rivets.

Conclusion

L'ambition de ces travaux de thèse a été de revisiter l'expérience du balayage en proposant des essais plus représentatifs du phénomène et répétables et en développant des diagnostics plus précis que ce qui existe déjà dans la littérature. Cette mise en place expérimentale a permis d'obtenir des résultats inédits sur le phénomène de balayage qui devraient servir de base de données de référence pour les futures générations de codes de simulation.

Ce banc d'essai devrait également permettre de réaliser des configurations de balayage maîtrisées pour la définition de structure d'aéronefs plus complexes en termes de géométrie et de motorisation. Ainsi, les *Urban air mobility*, avec l'avènement des VTOL, ont des géométries et des systèmes de propulsion en rupture qui conduisent à des écoulements autour de

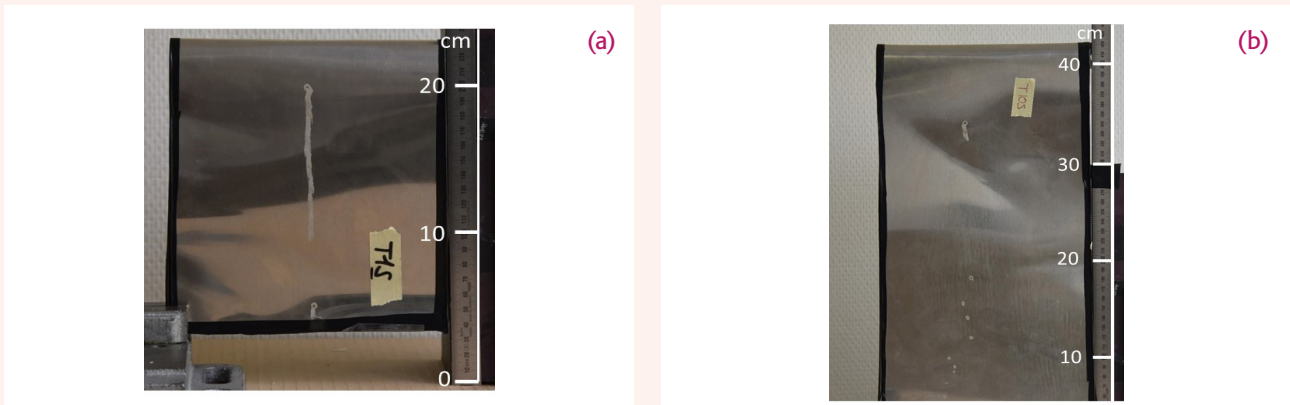


Figure 7 : Impacts de pieds cathodiques (a) et de pieds anodiques (b). On peut y observer les traces laissées par le pied d'arc : une ligne et un saut pour l'échantillon cathodique et des impacts ponctuels dans le cas de l'échantillon anodique.

- l'engin très particuliers sur lesquels les approches simplifiées ne peuvent pas être appliquées. D'autre part, de nouveaux types de moteur comme le moteur RISE de SAFRAN ont un concept d'*open rotor* qui nécessite de connaître plus finement le mécanisme de balayage sur ces systèmes tournants. Enfin, le générateur électrique développé pourra servir à étudier les arcs DC dans les réseaux de puissance dans le cadre de l'avion plus électrique. ■

Références

- [1] Plumer, J. A. (2012, September). Laboratory test results and natural lightning strike effects: How well do they compare. In 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP) (pp. 1-17). IEEE.
- [2] Andraud, V., Sousa Martins, R., Zaepffel, C., Landfried, R., & Teste, P. (2021). Design and implementation of DC-to-DC converter topology for current regulated lightning generator. *Review of Scientific Instruments*, 92(10).
- [3] Hundertmark, S., Schneider, M., & Vincent, G. (2013). Payload acceleration using a 10-MJ DES railgun. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41(5), 1455-1459.
- [4] Andraud, V., Sousa Martins, R., Zaepffel, C., Landfried, R., & Teste, P. (2022). Development of a low voltage railgun in the context of a swept lightning stroke on an aircraft. *Review of Scientific Instruments*, 93(8).
- [5] Andraud, V., Sousa Martins, R., Zaepffel, C., Landfried, R., Testé, P., & Lalande, P. (2023). Physical properties of the swept arc channel in the context of lightning strikes to aircraft. *Journal of Physics D: Applied Physics*.
- [6] Andraud, V., Sousa Martins, R., Zaepffel, C., Landfried, R., Testé, P., & Lalande, P. (2024). Arc root dynamics in the context of lightning strikes to aircraft. *Journal of Physics D: Applied Physics*.

Résumé

Lors du foudroiement d'un aéronef, il se produit un mouvement relatif entre l'arc électrique de foudre et l'aéronef. Ainsi le point d'attachement de la foudre peut se mouvoir sur toute la surface de l'avion – on parle de balayage de l'arc de foudre. Face à ce danger, les avionneurs doivent prévoir de protéger toutes les parties de l'aéronef. Afin d'optimiser cette protection, un retour d'expérience est nécessaire. Pour recréer une expérience représentative du foudroiement d'un aéronef, un générateur électrique haute puissance reproduisant la foudre ainsi qu'un lanceur électromagnétique de type Railgun propulsant des échantillons aéronautiques sont conçus et développés. Leur couplage permet alors la reproduction et l'étude du phénomène de balayage : des mesures électriques et des diagnostics optiques permettent de remonter aux grandeurs électriques, hydrodynamiques et thermiques de la colonne d'arc en mouvement et de caractériser le déplacement du point d'impact. ■

Abstract

In the domain of aeronautical industry, the risk of lightning strike is taken into account from the aircraft design as the phenomenon statistically occurs every 1000 flight hours. During the strike, there is a displacement of the impact area on the aircraft outer skin. This phenomenon is referred to as swept-stroke. Thus, all the parts of the aircraft are exposed to the risk of direct electric and thermomechanical damages induced. Therefore, it is necessary to understand the physical mechanisms that drive the phenomenon to optimize relevant protections. To reproduce a representative experiment of swept-stroke, a high-power electric generator reproducing lightning electric arcs and an electromagnetic launcher propelling test samples are developed and implemented. They enable the reproduction and the study of the swept-stroke: electrical measurements and optic diagnostics are implemented to characterize the electric, hydrodynamic and thermal behavior of the moving electric arc. ■