

Générateur Boost d'arcs électriques continus à partir de supercondensateurs

Vincent ANDRAUD, Philippe BAUMANN

French-German Research Institute of Saint-Louis, 68300 Saint-Louis, France

Dans les applications des lanceurs électromagnétiques à rails, un arc électrique de bouche peut se former entre les rails à la sortie du projectile pour évacuer l'énergie inductive du système électrique composé des rails et du générateur. Afin de développer des diagnostics électriques et optiques pour étudier à terme de tels arcs, un générateur d'arcs électriques stables est conçu et réalisé expérimentalement. L'objectif étant de générer des arcs à courant continu aux propriétés électriques et thermodynamiques connues, une topologie de générateur Boost est simulée théoriquement et testée expérimentalement. Son originalité consiste en l'utilisation d'un module de supercondensateurs comme source primaire afin de limiter les précautions liées à la haute tension et de faciliter la répétition des essais. Ainsi, des arcs de plus de plusieurs dizaines de cm régulés en courant avec plusieurs dizaines d'ampères sont obtenus avec une multiplication par 7 de la tension d'arc par rapport à la tension du module.

Générateur électrique, arcs électriques, convertisseur DC/DC, convertisseur Boost, supercondensateurs

1. INTRODUCTION

Dans les applications concernant les lanceurs à rails, des injections de courant de l'ordre de quelques MA permettent d'envoyer des projectiles de l'ordre du kg à quelques km/s. Lorsque le projectile quitte les rails, le circuit électrique fermé composé par le générateur, les câbles, les rails et le projectile s'ouvre instantanément alors qu'un courant pouvant atteindre jusqu'à quelques centaines de kA peut encore circuler. Cette ouverture est donc accompagnée de la formation d'un ou plusieurs arcs électriques de bouche successifs qui évacuent l'énergie inductive restant dans le circuit [1-2]. Leur influence sur l'écoulement à la sortie du projectile ou leur participation à la dégradation de l'état de surface des rails reste à évaluer.

Afin d'étudier de tels arcs, des diagnostics optiques et électriques tels que les techniques de spectroscopie, de Schlieren ou de PIV, etc. sont envisagés. Pour mettre en place et développer de tels diagnostics avant leur implémentation sur les arcs de bouche du lanceur, une première étape consisterait à les utiliser sur des arcs électriques stables et aux propriétés thermodynamiques et électriques définies. Ainsi, nous présentons dans cet article la conception et la mise en place expérimentale d'un générateur électrique capable de produire de tels arcs de manière sécurisée, répétitive et répétable. Nous définissons dans une première partie les propriétés électriques des arcs continus que l'on souhaite former afin de définir la source primaire, la topologie adaptée et le dimensionnement des éléments du générateur électrique. Dans une deuxième partie, nous présentons le montage expérimental électrique retenu, constitué du générateur électrique avec une boucle de

régulation et d'un vérin hydraulique. Dans une troisième partie, nous exposerons les résultats expérimentaux et les propriétés électriques et hydrodynamiques des arcs obtenus. Ces résultats seront analysés avec une caractérisation électrique et hydrodynamique des arcs formés dans une dernière partie afin de valider les performances de notre générateur.

2. CONCEPTION D'UN GENERATEUR D'ARCS CONTINUS

2.1. Modèle électrique d'un arc continu

Le générateur doit créer des arcs avec des propriétés électriques et thermodynamiques stables dans des conditions répétables et les plus sécurisées possibles. Il est donc envisagé de créer des arcs avec un courant relativement faible comparés à des arcs de Railgun – de l'ordre de quelques dizaines jusqu'à une centaine d'Ampères –. En négligeant les chutes de tension dues aux gaines de plasma à proximité des électrodes, de tels arcs peuvent être modélisés électriquement par des résistances linéiques. Cette approximation est vérifiée pour des arcs de plus de quelques cm [3-5]. Le champ électrique de la colonne d'arc ainsi que la tension d'arc varient respectivement entre 20 V/cm et 10 V/cm et entre 2 et 0.1 Ω /m pour des courants de 10 à 100 A [6]. Afin d'initier l'arc électrique, les deux électrodes sont mises en contact puis sont séparées lors du passage du courant par un vérin pneumatique qui atteint une vitesse maximale de 50 cm/s. Il est important de noter que la colonne d'arc peut présenter des tortuosités du fait de son propre champ magnétique et que sa longueur totale peut ainsi être supérieure à la distance inter-électrodes : des arcs de quelques dizaines d'ampères peuvent présenter un facteur de tortuosité jusqu'à 3 entre leur longueur de colonne et la distance entre les électrodes [7]. Ainsi, en utilisant les valeurs de champ électrique de la colonne d'arc mesurées dans [6] et en appliquant une vitesse d'élongation de la colonne d'arc de 50 cm/s pour un facteur de 1 et de 150 cm/s pour un facteur de 3 en considérant le cas extrême, nous obtenons les estimations de variation temporelle de la résistance totale de la colonne d'arc électrique lors de l'étirement dans le Tableau 1.

Tableau 1. Modèle électrique dynamique d'une colonne d'arc entre 1 et 100 A (adapté de [6])

Courant d'arc (A)	Champ électrique de la colonne (V/cm)	Résistance linéique (Ω /cm)	Variation de la résistance d'arc avec facteur de tortuosité de 1 (Ω /s)	Variation de la résistance d'arc avec facteur de tortuosité de 3 (Ω /s)
1	60	60	3000	9000
5	20	4	200	600
20	12	0.6	30	90

50	10	0.2	10	30
100	10	0.1	16	48

Ainsi, un arc de 20 A étiré à 150 cm/s (avec facteur de tortuosité de 3 rendant compte d'un cas extrême) peut se modéliser électriquement par une résistance variable d'environ 90 Ω/s en négligeant les chutes aux électrodes et la formation de tortuosités lors de l'élongation. Notre objectif est donc de concevoir un générateur capable d'alimenter au maximum une résistance variant d'environ 100 Ω/s avec un courant constant de 20 A et qui peut atteindre quelques dizaines de cm.

2.2. Choix d'une source primaire d'énergie

Pour générer un courant stabilisé de 20 A dans un arc pouvant atteindre 1 m et une tension de l'ordre de 1 kV, une puissance maximale de 20 kW est nécessaire. Pour ce niveau de puissance et des temps de l'ordre de la seconde, un stockage capacitif est plus adapté que l'utilisation de batteries. Comme nous cherchons à développer un générateur électrique avec une tension la plus faible possible pour éviter des risques électriques, nous préférons utiliser des supercondensateurs. En considérant cette technologie de condensateurs, la puissance maximale massique peut atteindre un facteur entre 10 et 100 comparé à des batteries tout en présentant un meilleur rendement pour des applications de l'ordre de la seconde [8]. La technologie des supercondensateurs permet donc d'envisager un montage plus compact que pour des batteries.

Pour dimensionner le banc de condensateurs, nous évaluons l'énergie nécessaire pour former un arc de 20 A et l'étirer jusqu'à 1 m avec une vitesse d'élongation de 150 cm/s :

$$E_{arc} = \int R(t)I^2 dt = \int \frac{dR}{dt} I^2 t dt \quad (1)$$

avec E_{arc} l'énergie consommée lors de l'extension de l'arc, dR/dt la variation de la résistance d'arc, t le temps d'étirement de l'arc et I le courant d'arc. Pour les valeurs considérées à 20 A, l'énergie consommée par un arc est d'environ 200 kJ. Afin de travailler avec une source primaire d'énergie basse tension pour des raisons de sécurité, un module de supercondensateurs avec une tension maximum totale de 144 V et une capacitance équivalente de 63 F est alors envisagé. Son énergie maximale est alors de 650 kJ ce qui est supérieur à l'énergie évaluée des arcs envisagés.

Cependant, une source capacitive seule ne permet pas de fournir un courant constant à une charge variable. Il faut donc adapter un circuit de convertisseur DC/DC pour contrôler le flux d'énergie provenant de la source.

2.3. Adaptation d'un circuit Boost pour le générateur

Afin de délivrer un courant continu de 20 A à un arc électrique de taille et donc de résistance variable, une topologie de convertisseur DC/DC de type Boost représentée Fig. 1 est utilisée. Le convertisseur Boost est ici un choix naturel parmi les différentes topologies de convertisseur DC/DC car il permet d'obtenir une tension à la charge supérieure à la tension de la source. Dans notre application, le module de supercondensateurs peut être chargé en effet à une tension maximale de 144 V alors que la tension d'arc peut atteindre jusqu'à 1 kV.

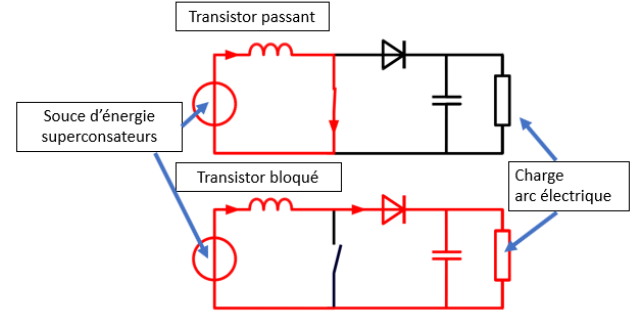


Fig. 1. Principe du convertisseur Boost pour régulation du courant d'arc

Afin de réguler le courant de l'arc qui se comporte comme une charge variable, une boucle de rétroaction agissant sur le transistor et inspirée de [9] est employée : lorsque le courant dans la charge est inférieur au courant de consigne, le transistor est passant et la bobine va se vider dans la charge. Lorsque le courant de la charge est supérieur au courant de consigne, le transistor est bloqué. Le banc de supercondensateurs recharge alors la bobine. Le condensateur de filtrage permet de maintenir la continuité de la tension aux bornes de la charge. Le circuit électrique est alors simulé avec le logiciel LT SPICE en prenant en compte le modèle électrique de l'arc et la source d'énergie à base de supercondensateurs présentée. Ainsi nous pouvons déterminer un dimensionnement d'inductance optimal à partir de composants présents dans le laboratoire. Notre choix s'est porté sur des bobines de type Brooks avec une inductance unitaire de 1 mH. Le choix de ces bobines porte sur leur meilleur compromis en termes d'inductance et de compacité. En fonction du nombre de bobines utilisées, on peut alors évaluer la taille et la durée maximale d'arc grâce au générateur. Un point de fonctionnement du circuit simulé est présenté dans le Tableau 1.

Tableau 2. Paramètres du générateur d'arcs développé issus de la simulation

Tension Source (V)	Capacitance (F)	Inductance bobine (mH)	Courant d'arc (A)	Durée d'arc (ms)	Taille d'arc (cm)
140	63	4	20	740	118

3. MISE EN OEUVRE EXPERIMENTALE DU GENERATEUR D'ARCS

3.1. Description du montage expérimental

Les paramètres obtenus par la simulation permettent alors de mettre en œuvre le circuit représenté en Fig. 2 avec des photos du montage complet présentées en Fig. 3. L'énergie primaire est fournie par le module de supercondensateur M35W-144-0063 de SECH avec les caractéristiques données précédemment. Le stockage inductif est assuré par la mise en série de 4 bobines de type Brooks avec une inductance totale de 4.3 mH et une résistance de 0.16 m Ω à 100 Hz. Le condensateur de filtrage C2 a une capacitance de 50 μF . Le transistor T2 utilisé est un IGBT issu du modèle 5SNA1200G450350 de ABB. Un circuit de protection composé d'un contacteur à la borne positive du module de supercondensateurs et d'une diode de roue libre placée en amont de la bobine est intégré. Une résistance de sécurité R1 de 2 Ω est mise en série avec la bobine afin d'empêcher une montée trop élevée de courant lors de la mise en contact des électrodes avec le vérin qui produit initialement une mise à la terre du condensateur de filtrage C2. L'électrode anodique reliée à la masse du circuit par la résistance de sécurité est constituée d'une pointe en laiton pour amorcer l'arc. Cette électrode peut s'allonger et se rétracter avec une vitesse

variable grâce à un vérin pneumatique commandé par un microcontrôleur. Ce vérin a une course maximale de 50 cm et une vitesse maximale de 50 cm/s. L'électrode cathodique est fixe et localement plane au niveau du contact avec la pointe anodique. Elle est en cuivre. Entre deux expériences, les dépôts sur les électrodes dus à leur érosion par les pieds d'arcs sont évacués avec du papier de verre et les électrodes sont nettoyées avec de l'acétone.

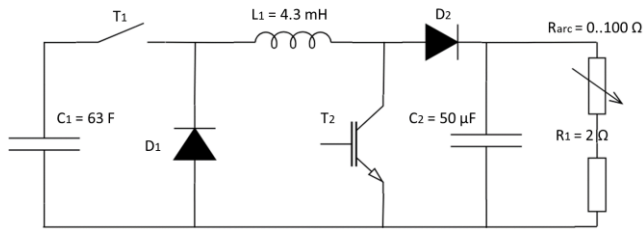


Fig. 2. Schéma du circuit électrique du générateur Boost.

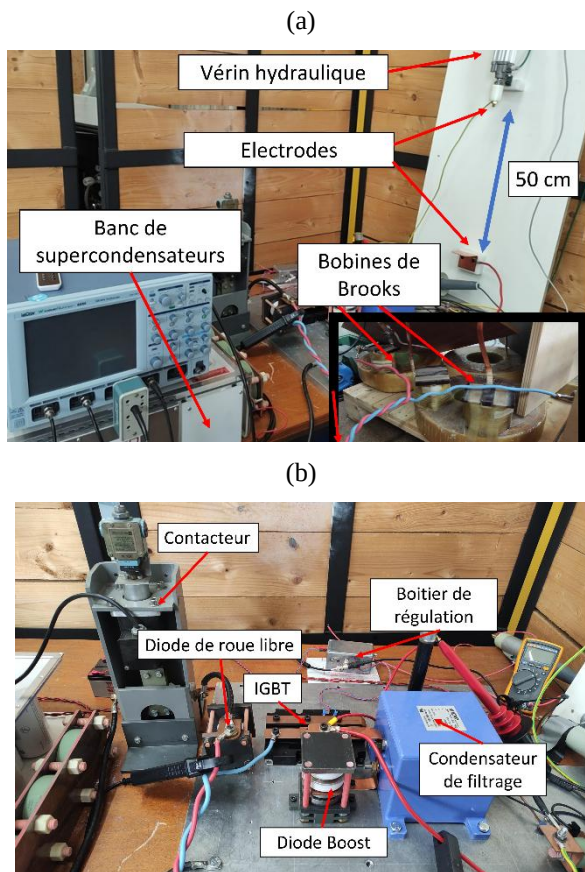


Fig. 3. Photographies du montage électrique de type générateur Boost.

3.2. Description de la régulation du courant d'arc et du matériel expérimental

La boucle de régulation est assurée par une sonde à effet Hall de type TEKTRONIX A622 AC/DC dont le signal est comparé à une valeur consigne par un microcontrôleur activant la grille de l'IGBT via un circuit driver selon le fonctionnement de la topologie Boost a été évoqué dans la section 2.3. Afin de ne pas stresser l'IGBT qui présente un retard de 3 µs lors de l'ouverture, une fréquence maximale de 100 kHz est autorisée par le microcontrôleur. Cette limitation de la fréquence de régulation a également l'effet de diminuer les phénomènes de

surtensions à l'ouverture qui peuvent être destructifs pour le composant comme vu dans [9].

Les mesures de tensions aux bornes de la charge composée de l'arc électrique et de la résistance de sécurité de 2 Ω et aux bornes de l'IGBT sont effectuées à l'aide de sondes TEKTRONIX P6015. La mesure de courant dans la bobine composée des 4 bobines de Brooks est réalisée par une sonde PICO TA167.

Des vidéos et des photos de l'étirement de l'arc électrique sont accomplies à l'aide d'une caméra de référence Photron Fastcam Nova S16 type 1100K-M-32GB. La fréquence d'acquisition est de 8000 images par seconde, la vitesse d'obturation est de 0.7 µsec et la résolution est de 512x1024 pixels.

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET VALIDATION DU GENERATEUR

Les courbes de courant et de tension d'arc et du circuit électrique lors de l'étirement du vérin hydraulique couplé au générateur de foudre sont décrites en Fig. 4 et des photos successives de l'expérience avec notamment la formation et l'étirement de l'arc sont données en Fig. 5. La tension initiale du banc de supercondensateurs est de 120 V. Dans un premier temps, une fois que les condensateurs sont chargés à la tension d'utilisation, le contacteur T1 est déclenché alors que le vérin est retracté : le module de supercondensateur se décharge partiellement dans le condensateur de filtrage à travers l'inductance. Le vérin hydraulique est alors enclenché. Lors de la mise en contact des électrodes (Fig. 5(a)), le condensateur de filtrage C2 se vide à travers les électrodes en contact et la résistance R1 de 2 Ω en série. C'est alors que la régulation de courant dans la branche électrodes et résistance série s'active : l'IGBT T2 s'ouvre et se ferme afin d'assurer un courant de 20 A dans la branche ; la tension mesurée est alors d'environ 40 V avant la formation de l'arc. Comme l'arc n'est pas encore formé, la résistance de 2 Ω seule dissipe une faible partie de l'énergie transmise à la bobine par le banc de supercondensateurs : le courant monte en moyenne dans la bobine durant les phases d'activation et désactivation de l'IGBT. Le courant dans la bobine atteint alors un maximum de 1160 A au bout de 156 ms lorsqu'il y a un équilibre entre la puissance maximale délivrée par le banc de supercondensateurs et la puissance dissipée par la résistance équivalente de la bobine et la résistance de la charge. Ensuite, les électrodes se séparent et forment l'arc (Fig. 5(b)), ce qui est traduit par une légère augmentation de la tension d'arc à 158 ms – notamment due à la formation d'un canal d'arc résistif et des chutes de tension anodique et cathodique. Le courant dans l'arc est alors régulé à 20 A.

On observe alors que la tension d'arc augmente avec l'étirement de la colonne d'arc (Fig. 5(c)) et que le courant stocké dans la bobine décroît lentement avant de s'effondrer totalement lors des dernières 50 ms. Ainsi la régulation n'arrive plus à compenser la consommation de puissance de l'arc : la charge de la bobine par le module de supercondensateurs lors de la fermeture de l'IGBT ne compense pas la décharge de la bobine dans la colonne d'arc. La régulation du courant d'arc est par contre bien maintenue à 20 A pendant toute la durée de l'arc. L'arc est alors étiré jusqu'à environ 50 cm avant son extinction (Fig. 5(d)). On observe que la tension maximale atteinte par l'arc est environ 7 fois supérieure à la tension initiale des supercondensateurs ce qui démontre le bon fonctionnement du montage Boost.

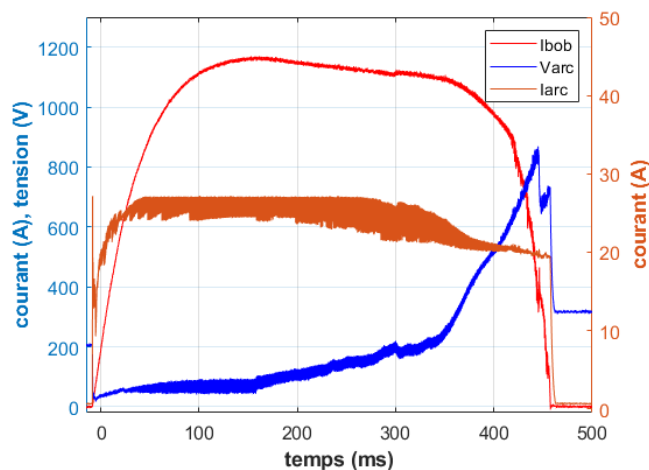


Fig. 4. Ondes de tension et courant de l'arc électrique, onde de courant dans la bobine de Brooks. L'ordonnée de référence pour la tension d'arc et le courant de bobine est à gauche et l'ordonnée de référence pour le courant d'arc est à droite. La mesure de tension d'arc est en fait la mesure de la tension aux bornes de l'arc et de la résistance de dissipation de $2\ \Omega$ – il s'agit également de la mesure de la tension aux bornes du condensateur de filtrage.



Fig. 5. Images successives de l'arc électrique formé par le générateur

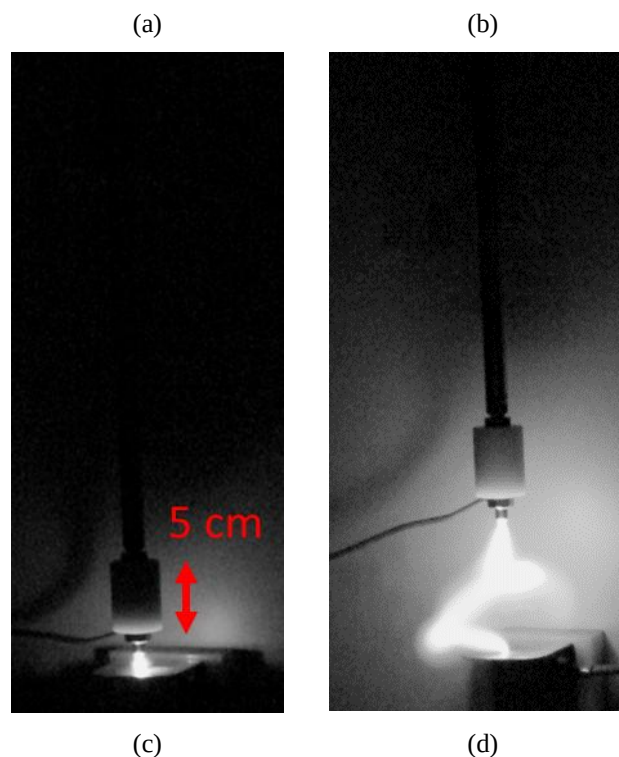
5. DISCUSSIONS

5.1. Comportement hydrodynamique de l'arc électrique

Pour caractériser l'extension spatiale de l'arc électrique lors de la séparation des électrodes et la formation de l'arc, des films de l'extension de l'arc sont obtenus par caméra rapide. Une séquence d'images pour une tension initiale de générateur de 130 V est donnée à la Fig. 6. Les colonnes d'arcs exposées en Figs. 6(b) et 6(c) démontrent une extension non linéaire de celle-ci lors de l'éloignement des électrodes. La véritable longueur de la colonne d'arc est donc supérieure à la distance inter-électrode. Elle ne peut donc être évaluée à partir de mesures provenant d'une seule caméra. L'extinction de l'arc est visible en Fig. (d) : la colonne perd son intensité lumineuse

et on peut observer l'extinction du pied cathodique. La visualisation du pied d'arc anodique est obstruée par la convection ascendante de particules chaudes issues de la colonne d'arc en extinction. La figure 7 représente la trace du déplacement du pied d'arc cathodique lors de l'expérience : on observe à l'aide de la caméra rapide que celui-ci se déplace continuellement du centre de la plaque cathodique où se produit le contact initial avec la pointe anodique vers le bord de la plaque cathodique lors de la séparation des électrodes. Ce type de mouvement continu est caractéristique des pieds d'arcs cathodiques [10]. Pour le pied d'arc anodique, on n'observe pas de déplacement particulier lors de l'extension de la colonne : celui-ci se présente sous la forme d'un jet conique visible sur les Fig. 6(b) et 6(c) alors que le pied cathodique présente un pincement local net de la colonne d'arc. Cet immobilisme du pied anodique est renforcé par un effet de pointe dû à la forme de l'électrode.

Lors de l'étirement de l'arc électrique, il peut arriver à la colonne d'arc de reclaquer : lorsqu'une boucle de courant provoque une elongation trop importante de la colonne d'arc par rapport à la longueur inter-électrode, l'arc peut court-circuiter cette boucle en formant une nouvelle portion d'arc afin de diminuer sa longueur. L'arc électrique devient ainsi moins résistif et minimise son énergie interne. Un tel exemple de reclaquage de l'arc est représenté en Fig. 8 avec les ondes de courant et de tension associées tracées en Fig. 9. Le reclaquage observé en Fig. 8 intervient à 234 ms et est nettement marqué en Fig. 9 par une chute de tension d'environ 260 V en 1.4 ms. Il est intéressant de noter que suite à cet événement, le courant remonte dans la bobine avant de redescendre de nouveau 15 ms plus tard : comme l'arc est réduit, il consomme moins de puissance de la bobine qui est alors rechargée en moyenne lors du cycle de régulation.



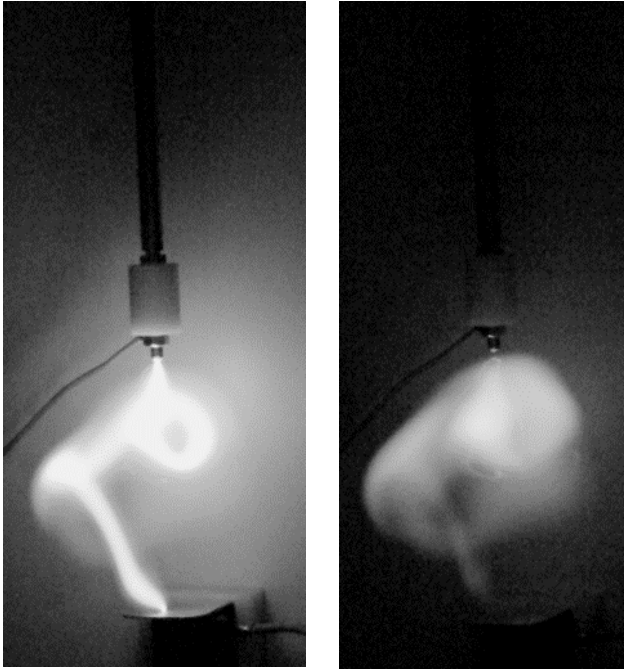


Fig. 6. Séquence d'images de l'arc électrique formé par le générateur obtenue à partir de l'arc électrique : t_0 (a), $t_0 + 141625 \mu s$ (b), $t_0 + 174875 \mu s$ (c) et $t_0 + 278375 \mu s$ (d).

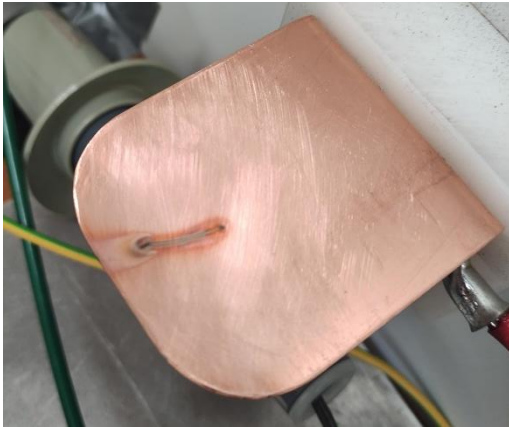
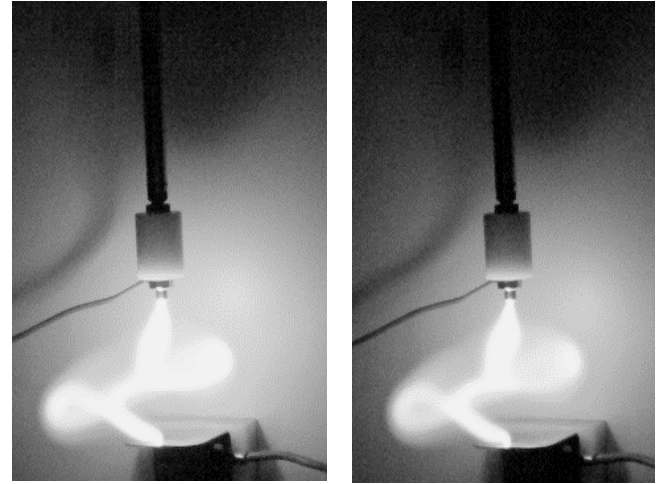


Fig. 7 Image du mouvement du pied d'arc cathodique après la formation et l'extinction d'un arc.

(a)

(b)



(c)

(d)

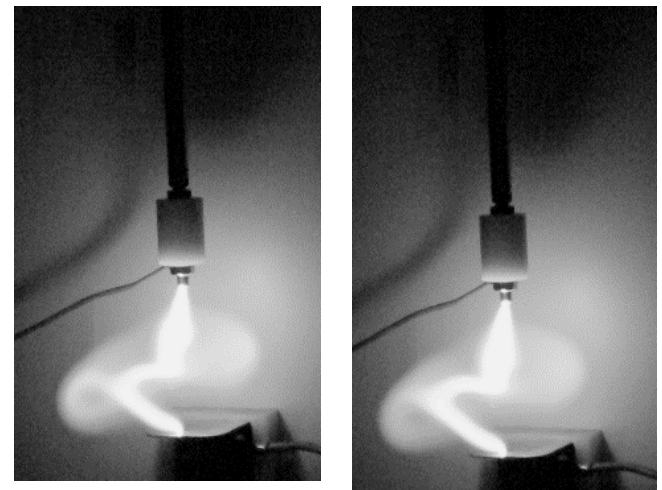


Fig. 8. Séquence d'images de l'arc électrique lors d'un reclaquage de la colonne d'arc à t_0 (a), $t_0 + 1625 \mu s$ (b), $t_0 + 5500 \mu s$ (c), $t_0 + 11000 \mu s$ (d).

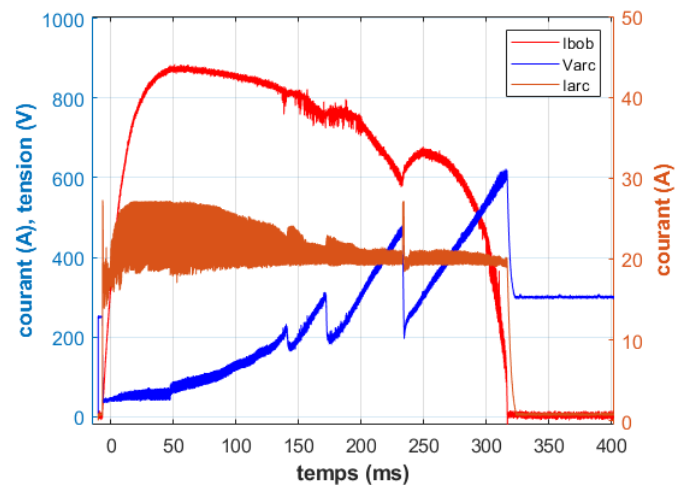


Fig. 9. Onde de courant et de tension d'arc et onde de courant de bobine avec de multiples reclaquages à 140 ms, 172 ms et 234 ms.

5.2. Modèle électrique de l'arc et comparaison avec les résultats de simulation

En utilisant les valeurs expérimentales de courant et de tension mesurées, on peut estimer l'évolution de la résistance

d'arc. Avec les mesures champ électrique interne indiquées dans [6] pour des arcs avec un courant de 20 A, l'évolution de la longueur d'arc peut être alors estimée en Fig. 10. L'arc étudié atteint une valeur estimée de 44 Ω , ce qui correspondrait à une longueur d'arc d'environ 75 cm pour une distance inter-électrode de 20 cm : la longueur d'arc peut ainsi atteindre jusqu'à 3,75 fois la distance inter-électrodes. La durée de vie de l'arc est alors de 380 ms et sa vitesse d'élargissement est alors en moyenne de 197 cm/s soit un peu plus que les 150 cm/s estimés. Cependant cette vitesse moyenne d'élargissement peut varier drastiquement d'un arc à l'autre pour une même tension initiale du module : les phénomènes de reclaquages ne sont pas répétitifs d'un arc à l'autre et limitent l'extension de la colonne d'arc. D'autre part la longueur d'arc maximale est inférieure de 36 % à celle estimée lors des simulations avec une durée environ 2 fois inférieure. Cela peut en partie être expliqué par la possibilité de l'arc de reclaquer et par la dynamique d'extension de l'arc qui est plus complexe qu'une extension linéaire avec le temps.

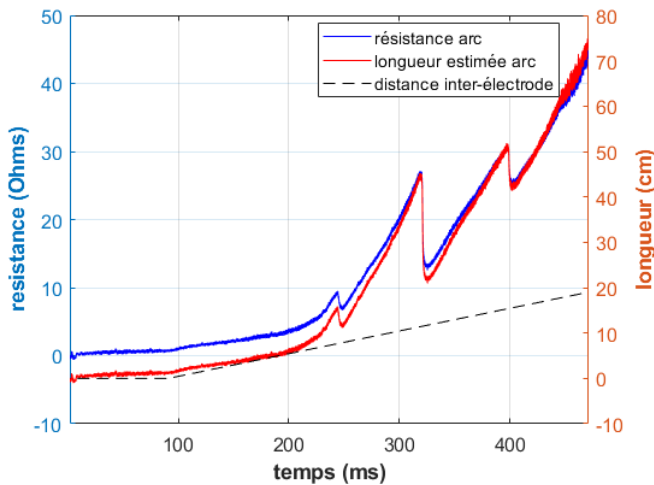


Fig. 10. Evolution de la résistance, de la colonne d'arc et de la distance inter-électrode lors de la génération d'un arc avec une tension de module de 140 V. L'arc est généré à 91 ms.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail présente la mise en place expérimentale d'un générateur d'arcs à courant continu avec une conception originale basée sur un banc de supercondensateur et un convertisseur Boost. Un facteur de démultiplication de 7 de la tension a été obtenu et a permis de générer des arcs régulés avec un courant de 20 A atteignant des longueurs jusqu'à 75

cm. Ce générateur d'arc va alors permettre le développement et la validation de diagnostics optiques ultérieurs afin d'étudier les arcs de bouches dans les lanceurs électromagnétiques. Il pourra également permettre de caractériser le comportement électrique et le comportement hydrodynamique d'arcs avec une intensité entre 10 et 100 A. Des améliorations pourront être apportées au générateur afin d'améliorer le respect de la consigne de courant – notamment par la mise en place de régulateurs PID dans le montage – et d'augmenter la longueur d'arc en ajoutant d'autres modules en série. Des études des propriétés d'arc en modifiant le courant de consigne et la vitesse d'extension inter-électrodes pourront alors être menées.

7. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient David Bluntzer, Maxime Berard, Farid Alouahabi, Volker Brommer et Fayleon Li pour leur aide et leurs conseils sur le montage expérimental. Ces travaux ont été soutenus par les ministères de Défense Français et Allemand.

8. REFERENCES

- [1] Schneider, M., M. Woetzel, and W. Wenning. "The ISL rapid fire railgun project RAFIRA—Part II: First results." *IEEE Transactions on Magnetics* 45.1 (2009): 448-452.
- [2] Andraud, V., Gapenne, P., Hassler, Q., Scharf, H., & Schneider, M. (2025). Study and implementation of a new rail geometry for a 10 MJ large caliber electromagnetic launcher. *AIP Advances*, 15(4).
- [3] Weizel, W., & Rompe, R. (1947). Theorie des elektrischen Funkens. *Annalen der Physik*, 436(6), 285-300. A. E. Vlastos, J. Appl. Phys. 40, 4752-4760 (1969).
- [4] Vlastos, A. E. (1972). The resistance of sparks. *Journal of Applied physics*, 43(4), 1987-1989. King, L. A. (1962). The voltage gradient of the free burning arc in air or nitrogen. *Ionization Phenomena in Gases, Volume I*, 871.
- [5] Sunabe, K., & Inaba, T. (1990). Electric and Moving Characteristics of dc Kiloampere High-Current Arcs in Atmospheric Air. *Electrical engineering in Japan*, 110(1).
- [6] King, L. A. (1961). The Voltage Gradient of the Free-burning Arc in Air or Nitrogen, Reference G/XT172. *British Electrical and Allied Industries Research Association, Leatherhead, Surrey, England*.
- [7] Landfried, R., Boukhelifa, M., Leblanc, T., Teste, P., & Andrea, J. (2019). Stability, spatial extension and extinction of an electric arc in aeronautical conditions of pressure under 540 V DC. *The European Physical Journal Applied Physics*, 87(3), 30901.
- [8] Musolino, V., Tironi, E., & di Milano, P. (2010, October). A comparison of supercapacitor and high-power lithium batteries. In *Electrical systems for aircraft, railway and ship propulsion* (pp. 1-6). IEEE.
- [9] 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).
- [10] Andraud, V., Martins, R. S., Zaepffel, C., Landfried, R., Teste, P., & Lalande, P. (2024). Arc root dynamics in the context of lightning strikes to aircraft. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 57(17), 175204.