

Mesure de la distribution spatiale de température de plasma d'arc électrique dans l'air en régime DC

Carla PIETRI, Romaric LANDFRIED, Thierry LEBLANC, Philippe TESTÉ

Laboratoire GeePs, UMR CNRS-CentraleSupélec 8507, UPMC et Université Paris-Sud, 11 rue Joliot-Curie,
91192 Gif-sur-Yvette Cedex, France
carla.pietri@centralesupelec.fr

RESUME – Dans cet article nous proposons une mesure de la distribution spatiale de la température moyenne dans un plasma d'arc électrique. Cette mesure résolue dans le temps est accompagnée de mesures électriques (tension/courant). L'originalité de la méthode réside dans le fait que l'emploi de deux caméras permet une très bonne résolution spatiale. Les arcs étudiés sont des arcs libres dans l'air, l'intensité du courant est de quelques dizaines d'ampères (sous 540 VDC) les durées d'arc sont de l'ordre de la centaine de ms. Les électrodes sont en cuivre.

Mots-clés – Arc Électrique, Mesure de température

1. INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, l'électrification des moyens de transport connaît un essor considérable, et s'accompagne d'une augmentation de la puissance électrique embarquée [1], [2]. Sur les réseaux de bords d'aéronefs, cette évolution s'est traduite par le choix technique d'élever la tension des réseaux de bords, en particulier la tension DC, jusqu'à des valeurs de tension de 540 VDC (voire plus). Dès lors, plusieurs problématiques en lien direct avec cette évolution apparaissent :

- L'augmentation de tension ainsi que les conditions particulières de pression de vol favorisent l'apparition et la stabilisation d'arcs électriques de défaut [3].
- L'utilisation de tensions d'alimentation continues et les valeurs élevées de ces tensions (ainsi que les conditions de pression [4]) rendent particulièrement complexe la coupure des circuits.
- Dans ces nouvelles conditions l'estimation de l'expansion de l'arc et des dommages causés par les défauts d'arc aussi bien au niveau du défaut (bien souvent des câbles) qu'au niveau de l'environnement sont nécessaires.

Ainsi, l'étude que nous présentons dans cet article est une première étape au sein d'une étude plus vaste dont l'objectif est de caractériser l'arc électrique en régime DC en condition aéronautique, tant du point de vue de ses caractéristiques électriques, thermiques que des échanges énergétiques avec le milieu environnant. Dans ce travail nous proposons un dispositif pour mesurer la température du plasma pour des arcs électriques en condition de pression aéronautique pour des intensités du courant de quelques dizaines d'ampères. Une première partie décrit les travaux précédemment présentés dans la littérature. Dans une deuxième partie nous présentons la méthode mise en œuvre pour cette mesure, enfin dans une troisième partie les résultats expérimentaux sont présentés et commentés en corrélation avec les mesures électriques.

2. MESURE DE TEMPÉRATURE DE PLASMA POUR LES ARCS ÉLECTRIQUES - MÉTHODE DES INTENSITÉS RELATIVES

La méthode des intensités relatives a déjà été proposée par différentes équipes pour obtenir une distribution spatiale de la température d'une colonne d'arc [5], [6], [7] mais aussi une ré-

solution temporelle [7], [8]. De telles mesures ont été réalisées pour des arcs d'ouverture dans [7] sous des conditions de 75 V et 8 A en régime DC avec des électrodes en AgCu (30 % en masse de cuivre), ainsi que dans [6] sous 50 VDC avec des courants de 3,3 A ou 5 A et des électrodes en argent. Dans [5], des arcs de soudage TIG (dans l'argon) avec anode en cuivre sont étudiés, sous des intensités de courants de l'ordre de la centaine d'ampères. Enfin T. Vazquez [8] étudie des arcs de défauts entre des faisceaux de câbles en cuivre ou en aluminium dans l'air à 10 A. Selon certaines applications, notamment celle des travaux de Bachmann *et al.* [5], il est possible de remonter jusqu'à un profil radial de température, à condition que l'arc soit axisymétrique et stable. Cette hypothèse est valable pour des arcs de faible longueur, et aussi des arcs stabilisés, ce qui est rarement le cas d'un arc libre dans l'air; cela n'est pas applicable sur toute la durée de l'arc.

3. MÉTHODE DÉVELOPPÉE : LES INTENSITÉS RELATIVES

3.1. Principe

Le coefficient d'émission ε_{ij} d'une raie spectrale qui correspond à une transition électronique d'un niveau d'énergie i vers un niveau d'énergie j inférieur peut s'écrire, pour un plasma à l'équilibre thermodynamique local (ETL) et en faisant l'hypothèse que les populations de particules suivent une distribution de Boltzmann [9] :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{4\pi} \hbar \omega_{ij} A_{ij} n_i \quad (1)$$

où $\hbar$ est la constante de Planck, ω_{ij} la fréquence du photon émis lors de la transition, A_{ij} la probabilité de la transition, et avec n_i désignant la population atomique considéré au niveau d'énergie i :

$$n_i = \frac{n}{Z(T)} g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \quad (2)$$

où g_i désigne la dégénérescence du niveau d'énergie i , n le nombre de particules du système, $Z(T)$ la fonction de partition du système, et k_B la constante de Boltzmann. Dans notre étude, on s'intéresse aux transitions associées aux longueurs d'onde $\lambda_1 = 578,2$ nm et à $\lambda_2 = 515,3$ nm. À ces transitions sont associés les coefficients d'émission notés ε_1 et ε_2 , auxquels on associe les niveaux d'énergie E_1 , E_2 ainsi que les probabilités de transition A_1 et A_2 , les dégénérescences g_1 et g_2 . Ces coefficients d'émission peuvent alors être reliés aux intensités des pixels sur deux images I_1 et I_2 . Sous les mêmes hypothèses, on peut écrire [9] :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{A_2 g_2 \lambda_1}{A_1 g_1 \lambda_2} \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right) \quad (3)$$

Ainsi, si l'on duplique une image d'un arc électrique et que l'on filtre les images résultantes autour de raies d'émission à λ_1 et λ_2 , on peut en déduire une distribution de la température du plasma, suivant 4.

$$T(x, y) = \frac{E_2 - E_1}{k_B} \cdot \frac{1}{\ln \left(\frac{A_2 g_2 \lambda_1}{A_1 g_1 \lambda_2} \right) - \ln \left(\frac{I_2(x, y)}{I_1(x, y)} \right)} \quad (4)$$

où x, y représentent les coordonnées des pixels. Dans le cadre de notre étude, les arcs sont amorcés par fil explosé en cuivre, avec des électrodes en cuivre. Les coefficients $\varepsilon_1, \varepsilon_2, A_1, g_1, A_2, g_2, E_1, E_2, \lambda_1, \lambda_2$ utilisés sont tabulés dans [10] et donnés dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Valeurs numériques des coefficients pour le calcul de la température [10]

λ_i [nm]	$A_i g_i$ [s^{-1}]	E_i [eV]
$\lambda_1 = 578,2$ nm	$A_1 g_1 = 3,30 \times 10^6 s^{-1}$	$E_1 = 3,79$ eV
$\lambda_2 = 515,3$ nm	$A_2 g_2 = 2,40 \times 10^8 s^{-1}$	$E_2 = 6,19$ eV

3.2. Dispositif expérimental

Les arcs étudiés sont amorcés par fil de cuivre explosé, de diamètre $200 \mu m$, à l'aide d'une alimentation DC constituée de plusieurs bancs de supercondensateurs. Cette alimentation peut délivrer une impulsion de courant d'au maximum deux secondes à 300 A, sous 1200 V. Deux images du même arc au même instant sont réalisées à l'aide d'un cube séparateur. Les deux images traversent des filtres interférentiels. Après cette étape, chaque image est capturée par une caméra. Contrairement aux montages décrits dans les travaux précédemment cités, nous proposons un montage à deux caméras, qui permet d'avoir une résolution spatiale importante. L'enceinte dans laquelle on a réalisés les arcs est présentée sur la figure 1 et une photographie du montage vu de dessus est présenté sur la figure 2.

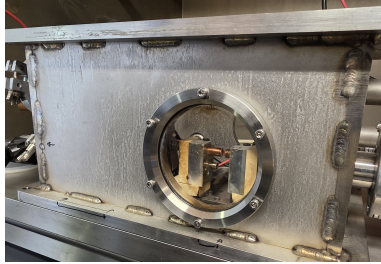


FIG. 1. Enceinte où sont réalisés les essais

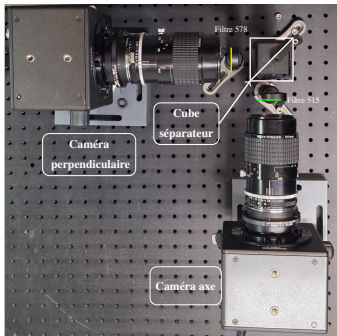


FIG. 2. Photographie du montage et principaux éléments

Les filtres interférentiels ont été choisis en fonction de la méthode d'amorçage et du matériau d'électrode, ici le cuivre, de

sorte à inclure les raies d'émission 515,3 nm et 578,2 nm, et exclure celles à 510,5 nm, 521,8 nm et 570,0 nm. Les filtres utilisés sont respectivement centrés sur $514,5 \pm 1,5$ nm et sur 580 ± 5 nm.

Les images sont enregistrées avec des caméras FASTCAM Mini UX50 avec une vitesse d'acquisition de 1000 images par seconde, une résolution de 1280×1024 pixels, avec une ouverture en $f/32$ pour chaque essai. Les temps de pose sont modifiés pour chaque essai afin de ne pas saturer les capteurs des caméras (à fort courant par exemple) ou de ne pas les sous-exposer et ne mesurer que du bruit (à environ 10 A). Avec ce dispositif, nous obtenons des résolutions spatiales de l'ordre de $30 \mu m/\text{pixel}$, là où celles de Bachman *et al.* [5] ou Vazquez [8] sont plutôt de l'ordre de $80 \mu m/\text{pixel}$.

3.3. Calibration

Les caméras enregistrent des images issues de filtres centrés sur des longueurs d'onde différentes, il faut donc appliquer un coefficient de rectification, qui correspond à la fonction de transfert du montage, aux pixels mesurés afin de prendre en compte ces différences. Dans cette partie nous expliciterons la façon de déterminer la fonction de transfert du montage, décomposée dans 5.

$$\frac{I_{515, mesure}}{I_{578, mesure}} = r_{cube \& Cam} \times \frac{tr_{515}}{tr_{578}} \times \frac{t_{exp, 515}}{t_{exp, 578}} \times \frac{I_{515, vrai}}{I_{578, vrai}}. \quad (5)$$

où $r_{cube \& Cam}$ comprend la réponse des caméras et du cube à une lampe tungstène calibrée et donc le calcul est développé ci-dessous, $tr_{515} = 0,939$ et $tr_{578} = 0,935$ sont les coefficients de transmission des filtres interférentiels, $t_{exp, 515}$ et $t_{exp, 578}$ les temps d'exposition correspondants respectivement à l'image issue du filtre 514,5 nm et 580 nm.

$$\text{Calcul de } r_{cube \& Cam} = \frac{I_{lampe W, camera \text{ axe}}}{I_{lampe W, camera \text{ perpendiculaire}}}$$

Un film de la source lumineuse calibrée (lampe tungstène) passant par le cube est réalisé pour chaque caméra, avec les mêmes réglages : 1000 images par seconde, $1/32\ 000$ secondes de temps de pose, et ouverture en $f/32$, afin de ne pas saturer les capteurs des caméras. Une image moyenne sur mille images de chaque film est ensuite réalisé, de sorte à lisser les variations d'intensité des pixels et les variations de la lampe. On réalise ensuite une détection de contour sur les deux images, ce qui permet d'obtenir deux images de même taille de la source lumineuse, qui sont présentées sur la figure 3. Les deux images moyennes sont superposées et le rapport des pixels est calculé, pixel à pixel. Le coefficient $r_{cube \& Cam}$ est la moyenne de ce rapport de pixels sur la frontière choisie, pour notre méthode on a choisi un cercle de rayon 3 autour du pixel d'intensité maximale, comme on peut le voir sur la figure 4. Les pixels d'intensité maximale ont les mêmes coordonnées sur la figure 3.

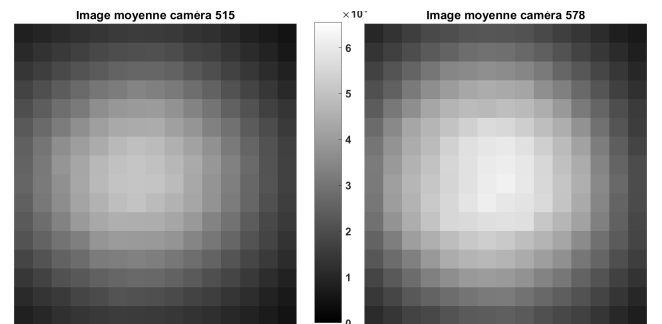


FIG. 3. Images moyennes sur 1000 images obtenues pour chaque caméra

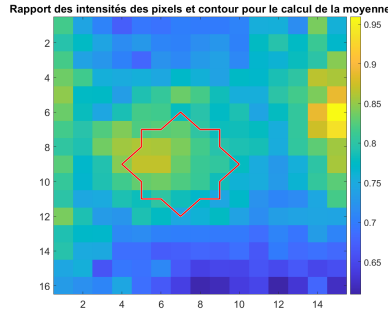


FIG. 4. Carte de $r_{cube\&Cam}$ des pixels et pixels dans lesquels on calcule sa moyenne, en rouge

Le coefficient $r_{cube\&Cam}$ est évalué à $r_{cube\&Cam} = 0.8113 \pm 0.0331$. Cette incertitude peut induire une erreur sur le calcul de la température atteignant localement jusqu'à 500 K, en particulier à proximité des électrodes, comme le montrent les figures 5 et 6. Ces figures représentent, pour un même instant et un même essai, la distribution spatiale de la différence de température obtenue lorsque $r_{cube\&Cam}$ est pris respectivement à sa valeur nominale (0,8113) et à ses bornes extrêmes supérieure et inférieure. Les valeurs de température calculées à proximité des électrodes doivent donc être interprétées avec prudence, en raison de la sensibilité locale au coefficient $r_{cube\&Cam}$.

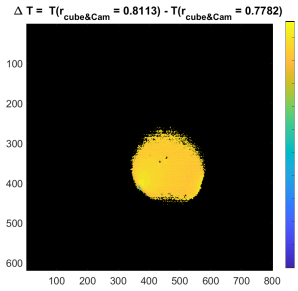


FIG. 5. Carte de la différence de température calculée lorsque $r_{cube\&Cam} = 0.8113 - 0.0331$

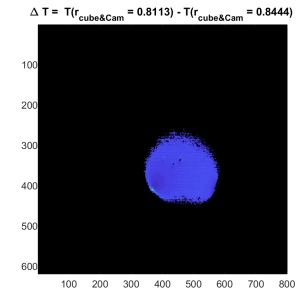
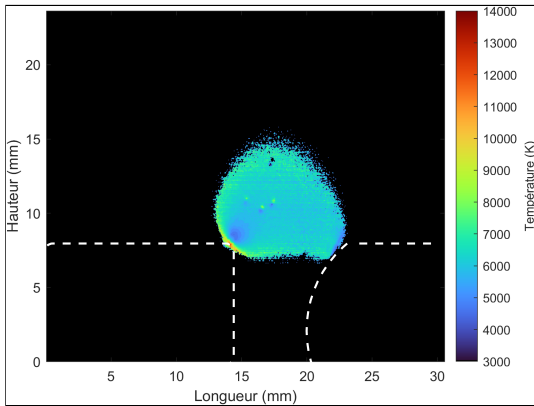
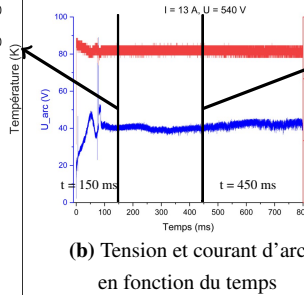


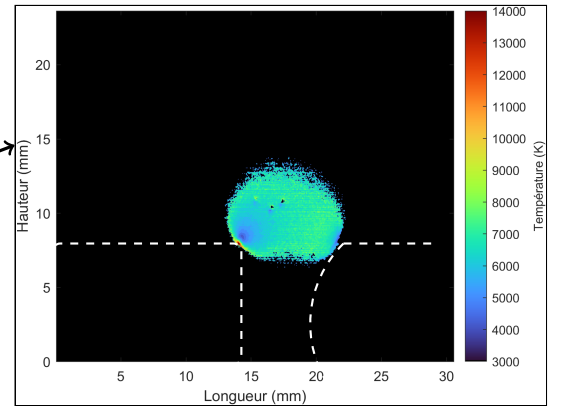
FIG. 6. Carte de la différence de température calculée lorsque $r_{cube\&Cam} = 0.8113 + 0.0331$



(a) Distribution de température de l'arc à $t = 150$ ms



(b) Tension et courant d'arc en fonction du temps



(c) Distribution de température de l'arc à $t = 450$ ms

FIG. 7. Cartographies de température à deux instants et allure de la tension et du courant d'arc pour un essai à 13 A, avec une distance inter-électrodes d'environ 5 mm

4. TEMPÉRATURES DE PLASMA

4.1. Superposition des images

La meilleure superposition d'image possible est déterminée à partir d'un calcul de corrélation entre les deux images de référence des électrodes prises avant l'arc. Une des deux images est rognée grossièrement autour des électrodes. Le calcul du maximum de corrélation entre ces deux images de référence permet de déterminer quel déplacement (dx , dy) il faut appliquer sur la seconde image pour les faire coïncider. Ce déplacement est ensuite appliqué à chaque image pour pouvoir faire le rapport des pixels et en déduire la température du plasma. Un exemple de ces images replacées avant arc est présenté sur la figure 8. Le

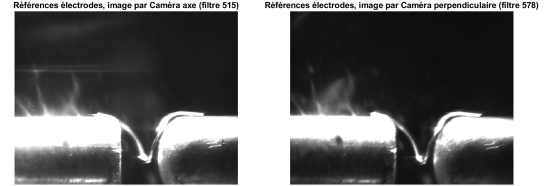


FIG. 8. Images de référence des électrodes avant amorçage de l'arc, pour un essai à $I = 13$ A.

calcul de température est ensuite effectué sur chaque image, en suivant 4. La distribution de température obtenue est moyennée sur l'épaisseur du plasma.

4.2. Exemples de résultats

Des exemples de résultats sont présentés sur les figures 9, 10 et 7, pour des intensités de courant d'arc voisines de respectivement 100 A, 25 A et 13 A. La tension d'alimentation est de 540 V pour tous les essais. Les cartographies de températures présentent les mêmes minima et maxima et le même nombre de "niveaux" (nuances). L'anode est l'électrode de gauche, la cathode est celle de droite. Les résolutions spatiales sont respectivement de $30 \mu\text{m}$ par pixel pour la figure 9, de $25 \mu\text{m}$ par pixel pour la figure 10 et de $38 \mu\text{m}$ par pixel pour la figure 7.

Influence de I L'extension spatiale de l'arc est la plus petite à faible courant, et pour $I = 13$ A, sur les figures 7.a et 7.c, il semble avoir une température moyenne entre 7 000 et 8 000 K. Des zones de température nettement plus faibles, de l'ordre de 5 000 K, apparaissent au centre de l'arc. Sur les figures 10 et 9, bien que le courant soit plus élevé, l'arc semble en moyenne plus froid avec des températures situées autour de 6 000 K, en particulier dans la colonne d'arc. Des zones plus chaudes sont

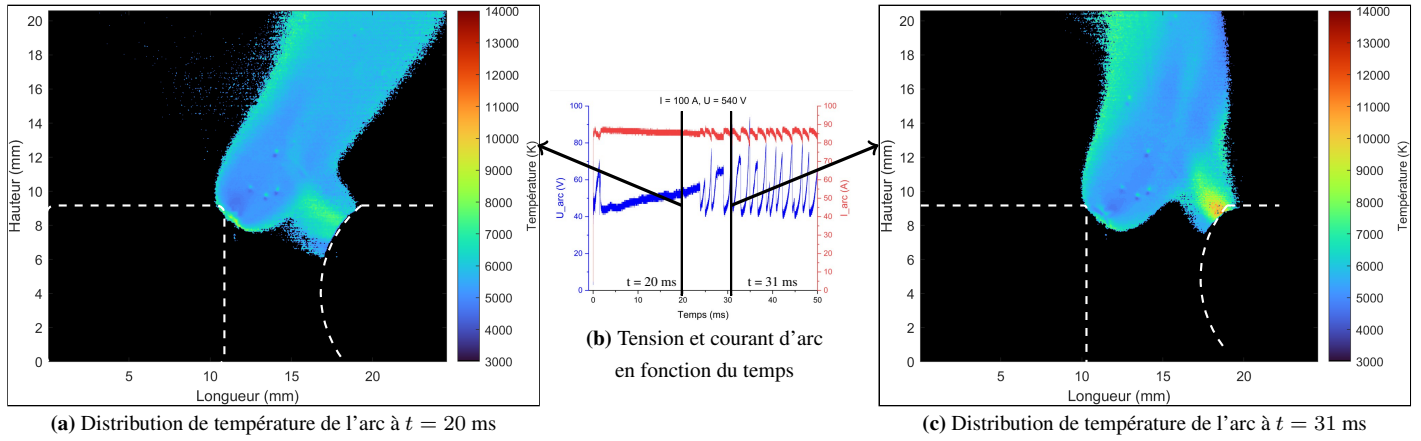


FIG. 9. Cartographies de température à deux instants et allure de la tension et du courant d'arc pour un essai à 100 A, avec une distance inter-électrodes d'environ 6 mm

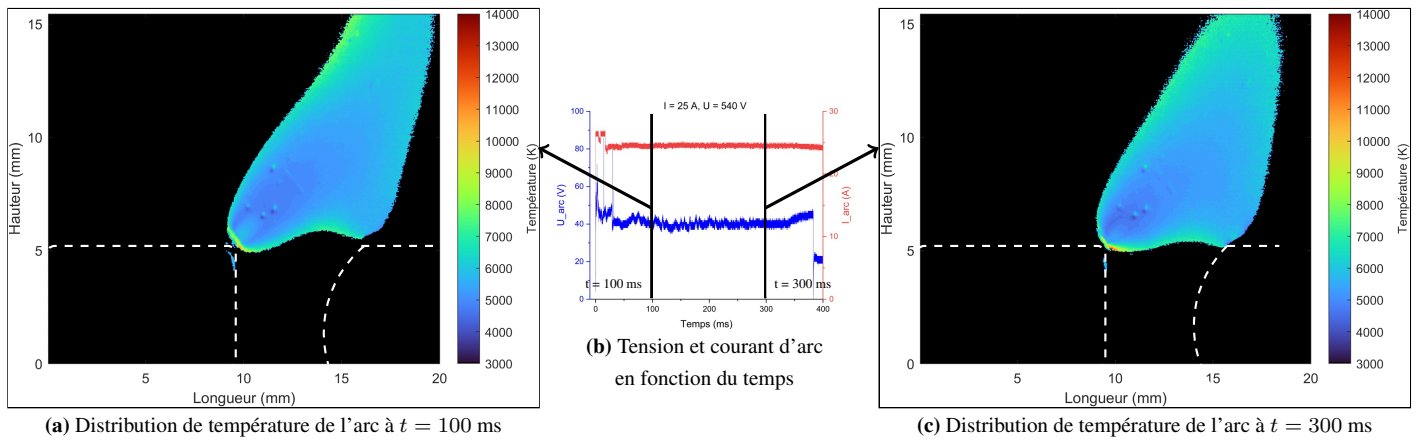


FIG. 10. Cartographies de température à deux instants et allure de la tension et du courant d'arc pour un essai à 25 A, avec une distance interélectrodes d'environ 5 mm

visibles à proximité des électrodes, mais aussi, étonnamment, sur le périmètre de l'arc. Un résultat similaire a été observé par Vazquez [8] qui obtient des températures de l'ordre de 10 000 K dans la colonne d'arc, avec 14 000 K au centre de la colonne avec un faisceau de câbles en cuivre là où des températures de l'ordre de 5 000 K sont atteintes dans [7] sur la colonne d'arc, de même pour [6]. Bachmann *et al.* [5], en revanche, estiment atteindre des températures de l'ordre de 20 000 K à 1 mm de la cathode. Nos résultats pour $I = 13$ A sont similaires à ceux obtenus dans [8] à 10 A, avec une résolution deux fois plus faible. L'arc présente des maxima de température proche de l'anode pour chaque courant.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cet article nous avons présenté un dispositif permettant une estimation de température au sein d'un arc électrique. L'originalité de la méthode réside principalement dans l'emploi de deux caméras rapides à faible temps de pose permettant d'obtenir une résolution spatiale de l'ordre de $30 \mu\text{m}$. Le dispositif et sa calibration ont été décrits en détails. Les premières mesures effectuées à pression atmosphérique pour des arcs d'une longueur de quelques mm, une intensité de courant dans la gamme 10 A – 100 A ont été présentées. Ces travaux vont se poursuivre d'une part en diminuant la pression du gaz plasmagène jusqu'à 200 hPa (dans la gamme des pressions aéronautiques) et d'autre part en changeant le mode d'amorçage de l'arc : en remplaçant l'amorçage de l'arc par fil de cuivre explosé par un amorçage

par ouverture. Le respect de l'ETL ou non dans ces gammes de pression sera alors étudié. Par ailleurs, des comparaisons seront effectuées en remplaçant notre dispositif à deux caméras par un dispositif à une seule caméra utilisant un système optique permettant de « projeter » l'image de l'arc sur un seul objectif. Ceci, au détriment de la résolution spatiale. Enfin, l'influence de l'interaction entre des matériaux isolants et l'arc électrique sur la température de ce dernier sera étudiée.

6. REMERCIEMENTS

Nous remercions T. Vazquez pour les échanges fructueux que nous avons eus avec lui. Cette recherche a été financée en tout ou partie, par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) au titre du projet « ANR-23-CE06-0033-01 ».

7. RÉFÉRENCES

- [1] X. Roboam, B. Sareni and A. D. Andrade, « More Electricity in the Air : Toward Optimized Electrical Networks Embedded in More-Electrical Aircraft », IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 6, no. 4, pp. 6-17, Dec. 2012, doi : [10.1109/MIE.2012.2221355](https://doi.org/10.1109/MIE.2012.2221355).
- [2] T. Lebey, A. Rumi and A. Cavallini, « Challenges for Electrical Insulation Systems in High Voltage Aviation Applications », IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 38, no. 6, pp. 5-11, November/December 2022, doi : [10.1109/MEI.2022.9916178](https://doi.org/10.1109/MEI.2022.9916178).
- [3] M. Boukhelifa, « Contribution à l'étude des arcs électriques sur réseau HVDC (540 VDC) en conditions aéronautiques », Thèse de doctorat,

Université Paris-Saclay, janvier 2021, no. 2021UPAST013. <https://theses.hal.science/tel-03261937v1>

- [4] T. Klonowski *et al.*, « Characterization of HVDC contactors in depressurized environment », More electrical aircraft conference, feb 2019, Toulouse, France. (hal-02331458)
- [5] B. Bachmann *et al.*, « High-speed three-dimensional plasma temperature determination of axially symmetric free-burning arcs », Journal of Physics D : Applied Physics, vol. 46, no. 12, p. 125203, mars 2013. DOI : 10.1088/0022-3727/46/12/125203.
- [6] M. Takeuchi et T. Kubono, « A spectroscopic detecting system for measuring the temperature distribution of silver breaking arc using a CCD color camera », IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 48, no. 3, pp. 678–683, juin 1999. DOI : 10.1109/19.772195
- [7] X. Zhou *et al.*, « Measuring arc temperature distribution and its time-evolution based on relative intensity method », Holm Conference on Electrical Contacts, pp. 80–85, sept. 2017. DOI : 10.1109/HOLM.2017.8088068
- [8] T. Vazquez, « Caractérisation de l'impact sur son environnement d'un arc électrique amorcé entre des câbles en conditions aéronautiques », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, juin 2021, no. 2021TOU30169. [En ligne]. Disponible : <https://theses.hal.science/tel-03637605>
- [9] A. Fridman, L.A. Kennedy, « Plasma Physics and Engineering (1st ed.) », 2004, CRC Press, <https://doi.org/10.1201/9781482293630>
- [10] A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader and NIST ASD Team NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.12), <https://physics.nist.gov/asd> [2025, January 13]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. DOI : <https://doi.org/10.18434/T4W30F>