HAL
open science

Etude expérimentale d'un arc impulsionnel entre des contacts Ag et Ag-C

Flavien Valensi, Manitra Razafinimanana, A. Gleizes, L Felberbaum, T. Lamara, T Morand

To cite this version:

Flavien Valensi, Manitra Razafinimanana, A. Gleizes, L Felberbaum, T. Lamara, et al.. Etude expérimentale d'un arc impulsionnel entre des contacts Ag et Ag-C. Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement , 2017, 10.18145/jitipee.v3i1.143 . hal-01624674

HAL Id: hal-01624674

https://hal.science/hal-01624674v1

Submitted on 26 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

Etude expérimentale d'un arc impulsionnel entre des contacts Ag et Ag-C

F. Valensi, M. Razafinimanana, A. Gleizes, L. Felberbaum,
T. Lamara, T. Morand

ISSN : 2428-8500

DOI : 10.18145/jitipee.v3i1.143

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.

Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement
ISSN : 2428-8500 *vol. 3, n°1, 5, 2017*
DOI : http://dx.doi.org/10.18145/jitipee.v3i1.143

Etude expérimentale d'un arc impulsionnel entre des contacts Ag et Ag-C

Flavien Valensi [(1)], Manitra Razafinimanana[(1)], Alain Gleizes[(1,2)], Laurent Felberbaum[(3)], Tarek Lamara [(3)], Thibaut Morand [(3)]

[(1)] Université de Toulouse, UPS, INPT, LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie), 118 route de Narbonne, F-31062, Toulouse Cedex 9 France
[(2)] CNRS LAPLACE F-31062 Toulouse France
[(3)] Sécheron S.A. Applied Research. Rue du Pré-Bouvier 25 – CH-1242 Satigny, Genève, Suisse
flavien.valensi@laplace.univ-tlse.fr

Résumé – *Ces travaux portent sur l'étude expérimentale d'un arc impulsionnel entre des électrodes en argent pur ou contenant 1% en masse de carbone. La configuration de l'arc et l'érosion des électrodes ont été étudiées par imagerie rapide pour caractériser l'influence de la composition des électrodes sur la dégradation du matériau. L'analyse de la microstructure des électrodes a également été réalisée. Les résultats montrent que l'érosion est nettement plus faible dans le cas de l'électrode contenant du carbone. Enfin une étude spectroscopique a été menée pour déterminer les raies observables dans le plasma.*

Mots clés *: arc impulsionnel, imagerie rapide, érosion des électrodes, spectroscopie*
DOI : 10.18145/jitipee.v3i1.143

Introduction

Certains phénomènes transitoires comme l'ouverture des contacts dans un circuit électrique peuvent conduire à des arcs de courte durée, de l'ordre de quelques millisecondes à quelques dizaines de millisecondes. Ces arcs dits impulsionnels sont souvent caractérisés par un courant élevé (quelques centaines d'ampères à plusieurs dizaines de kA) et peuvent conduire à une érosion importante des électrodes. Cette problématique est particulièrement importante dans le cas de l'appareillage électrique [1]. Les performances et la fiabilité des dispositifs de commutation (relais) ou de coupure (disjoncteurs) sont ainsi très dépendantes de la dégradation des contacts se produisant en présence d'un arc. Il est donc important de pouvoir quantifier l'interaction entre l'arc et les électrodes afin d'optimiser les dispositifs en terme de performance en fonctionnement nominal ou en cas de défaut. Dans cette étude expérimentale, le mode d'érosion des électrodes est comparé pour des électrodes en argent pur et constituées

d'un mélange d'argent et de carbone (1% en masse). Ces matériaux peuvent notamment être employés pour la réalisation de contacts de disjoncteur [2].

1. Dispositif expérimental

Le générateur utilisé pour créer l'arc est constitué d'un banc de 12 condensateurs d'une capacité totale de 144 mF pouvant être chargé sous une tension maximale de 430 V. Le courant maximal dépend de la tension de charge et de la résistance du circuit de décharge. Celle-ci est d'environ 75 ± 5 mΩ, la valeur pouvant varier légèrement en fonction notamment de la longueur libre des électrodes (partie entre le dispositif de fixation et l'accrochage de l'arc). Afin de limiter l'influence de ces variations, une résistance ballast de 0,1 Ω est ajoutée en série dans le circuit afin d'avoir un courant maximal de 2000 A pour une tension de charge de l'ordre de 340 V. Dans ces conditions, la constante de temps de la décharge du banc de condensateurs est de 24 ms. Cependant, pour mieux contrôler la quantité d'énergie déposée dans l'arc, ce dernier est interrompu à t = 3 ms en connectant à ses bornes un circuit de faible impédance (0,05 Ω), permettant de décharger les condensateurs en quelques millisecondes. Dans les deux cas (début et fin de l'arc), la commutation est opérée au moyen de thyristors [3]. L'énergie totale de l'arc est de 600 J, mais à la fin de l'impulsion l'érosion de l'électrode est négligeable : l'énergie correspondante (pour t <10 ms, I > 300 A) considérée n'est donc que de 560 J. L'amorçage de l'arc est réalisé en utilisant une impulsion de haute tension synchronisée avec la fermeture du premier thyristor.

La distance entre les électrodes peut être ajustée au moyen d'une vis micrométrique ; elle est fixée pour cette étude à 2 mm. Cette distance correspond à ce que l'on peut rencontrer dans un disjoncteur DC moyenne tension lorsque le courant est de l'ordre de 2 kA. La cathode, placée en position supérieure est constituée d'un barreau cylindrique en argent de diamètre 6 mm. L'extrémité est taillée en pointe avec un angle de 50°. Deux compositions d'anode ont été étudiées, la première correspondant à de l'argent massif (pastille d'épaisseur 3 mm pour un diamètre de 15 mm, brasée sur un bloc de cuivre) et la seconde à un mélange Ag + 1% en masse de carbone (cubes de 13 mm de côté, réalisés par frittage, le carbone étant introduit sous forme de nanotubes). Dans les deux cas, il a été vérifié que la zone d'accrochage de l'arc était plus réduite que la surface de l'électrode et que la différence de dimension n'avait pas d'influence.

La configuration géométrique de l'arc et le comportement dynamique de l'érosion sont observés par imagerie rapide (f = 9 kHz). Une étude spectroscopique qualitative (étude de raies atomiques et ioniques) a également été réalisée pour déterminer la faisabilité d'un diagnostic quantitatif par spectroscopie optique d'émission. D'une manière générale, ce type de diagnostic permet de déterminer les paramètres d'un plasma dans l'air à pression atmosphérique pour une température supérieure à 4000 K. Les acquisitions sont réalisées selon une direction perpendiculaire à l'axe de l'arc, pour une position intermédiaire entre les deux électrodes (à une hauteur h = 1 mm au-dessus de l'anode). Pour éviter les problèmes liés à la reproductibilité, plusieurs spectres sont enregistrés pour chaque essai avec une fréquence de 1,5 kHz. Pour être exploitable, une raie doit pouvoir être observée avec une intensité suffisante sur tout le rayon de l'arc pendant une durée suffisante, mais le plasma doit être également optiquement mince pour la longueur d'onde considérée. De plus, si on souhaite obtenir les données en fonction du rayon (en utilisant l'inversion d'Abel sur les spectres

enregistrés latéralement et intégrés selon des cordes) il est nécessaire de vérifier la symétrie du plasma.
L'évolution de l'état de surface de l'électrode est observée d'un point de vue macroscopique et la perte de masse consécutive à l'érosion est déterminée par pesée avant et après chaque essai. Pour étudier la microstructure de l'électrode, une coupe est réalisée et observée par microscopique optique après révélation des joints de grain. Pour cela, une solution d'acide nitrique à 65% diluée dans de l'eau désionisée dans une proportion d'un volume d'acide pour un volume d'eau est utilisée, la durée de la révélation étant fixée à 45 s.

2. Résultats

2.1. Erosion des électrodes

2.1.1. Caractérisation de l'érosion

L'observation par imagerie rapide montre que l'arc prend la forme d'un cône dont la pointe est accrochée à l'extrémité de la cathode, comme on peut le voir sur la Figure 1. On constate que selon le plan de visée l'arc est relativement symétrique, mais pour conclure il serait nécessaire de réaliser simultanément au moins une acquisition supplémentaire selon une autre direction (par exemple perpendiculaire à la première). Pour la hauteur d'arc considérée, on n'observe pas de différence notable de la forme de la colonne d'arc entre les deux types d'électrodes. Par contre, le mode d'érosion est nettement différent. Dans le cas d'une anode en argent, une érosion significative de l'électrode accompagnée d'éjection de gouttelettes de métal n'intervient qu'à partir de 1,2 ms après le début de l'arc. Un cratère se forme à la surface de l'électrode mais tout le métal fondu n'est pas éjecté, une partie s'accumulant au bord ou à proximité du cratère. Cette déformation entraîne donc un allongement de l'arc dont la zone d'accrochage n'est plus visible en totalité, étant masquée par le bord du cratère (visible notamment pour t = 5 ms sur la Figure 1). L'arc reste cependant centré et ne va pas s'accrocher sur les bords du cratère, car la profondeur est plus faible que le rayon. En effet pour un courant maximal de 2 kA, le cratère mesure 5 mm de diamètre pour 0,5 mm de profondeur (dimensions mesurées à partir de la coupe de l'électrode présentée sur la Figure 3b). Cependant, la perte de masse mesurée est inférieure à celle correspondant à ce volume (environ 50 mg) car l'essentiel du métal fondu reste sur la surface de l'électrode en s'accumulant autour du cratère.
Une partie seulement est éjectée sous forme de gouttelettes dont la trajectoire a tendance à suivre la surface de l'électrode plutôt que d'être dirigée vers le haut. Ce comportement peut être expliqué par l'équilibre entre les forces de pression exercées par l'arc, la tension de surface et les forces électromagnétiques [4]. Par ailleurs, une partie du métal fondu a été vaporisée. Cette quantité est plus difficile à déterminer mais en se basant sur les résultats disponibles dans la littérature pour des conditions comparables [5], on peut l'estimer à 1% de la masse fondue, soit 0,5 mg. L'énergie nécessaire à la fusion et la vaporisation du métal représente 6% de l'énergie électrique de l'arc. L'électrode contenant des nanotubes de carbone ne présente par contre pas de cratère à la suite de l'impact de l'arc et la zone d'accrochage de l'arc reste visible, comme on peut le voir sur la Figure 2.

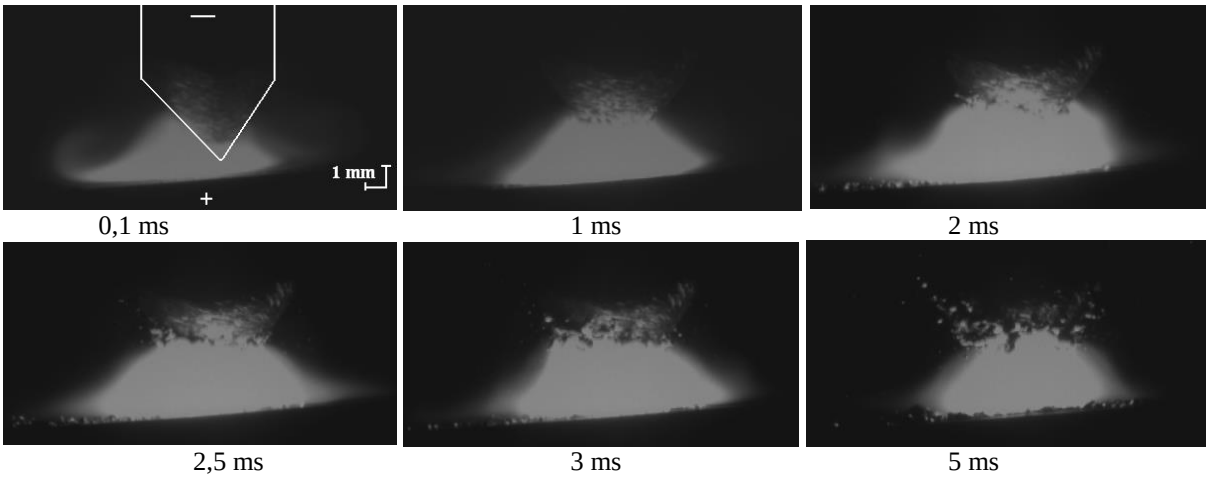

Figure 1. Evolution de l'arc pour une anode en argent [I_{max} = 2000 A]

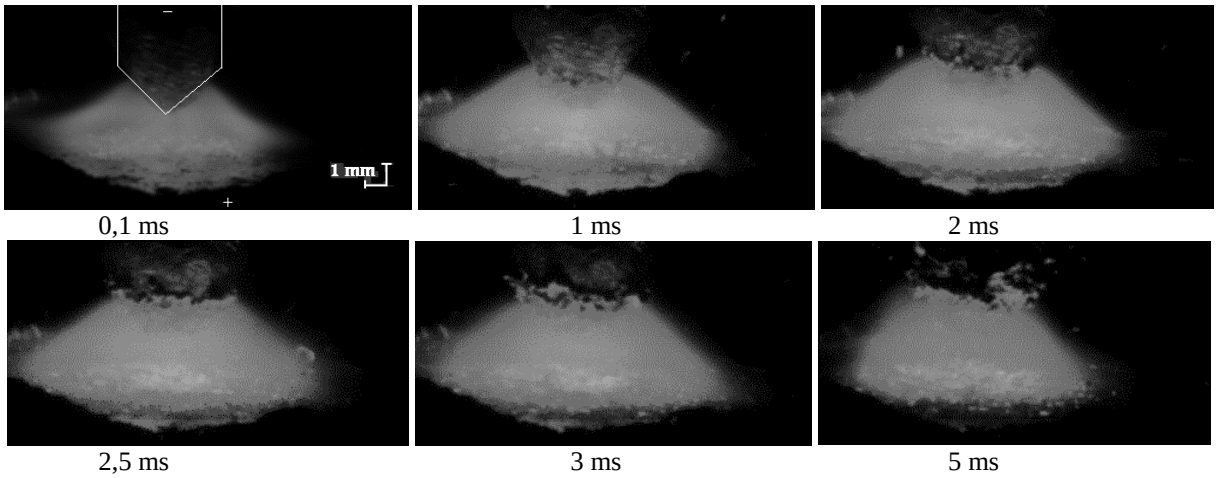

Figure 2. Evolution de l'arc pour une anode Ag +1% en masse de carbone [I_{max} = 2000 A]

L'érosion est plus uniforme avec des particules éjectées dès le début de l'arc dans toutes les directions. Leur dimension est plus faible que dans le cas de l'argent et seules quelques particules de diamètre important peuvent être observées. La quantité de métal redéposée est faible et la perte de masse est de l'ordre de 7 mg. On peut supposer que la proportion de métal vaporisée est la même que dans le cas de l'argent pur. L'aspect brillant de l'anode montre qu'une partie du métal vaporisé s'est redéposée sur l'électrode. Par ailleurs, il faut noter que le carbone quittant l'électrode est, soit éjecté sous forme solide, soit sublimé sans passer par une phase fondue. Il peut ensuite éventuellement réagir avec l'oxygène.

2.1.2. Etude de la microstructure

Dans le cas de l'électrode en argent massif une déformation importante de la surface de l'électrode apparaît, comme on peut le voir sur la Figure 3a. On constate que la microstructure est profondément modifiée avec plusieurs zones claires visibles en périphérie du cratère, comme on peut le voir sur la Figure 3b. Une large structure plus claire que la matrice, de

forme triangulaire, est également visible sous le centre du cratère. Il apparaît donc que la « zone affectée thermiquement » s'étend sur toute l'épaisseur de l'électrode en argent.
Sur la gauche du cratère, la vue en coupe montre que le métal éjecté s'étant solidifié sur place n'adhère pas à la surface de l'anode.

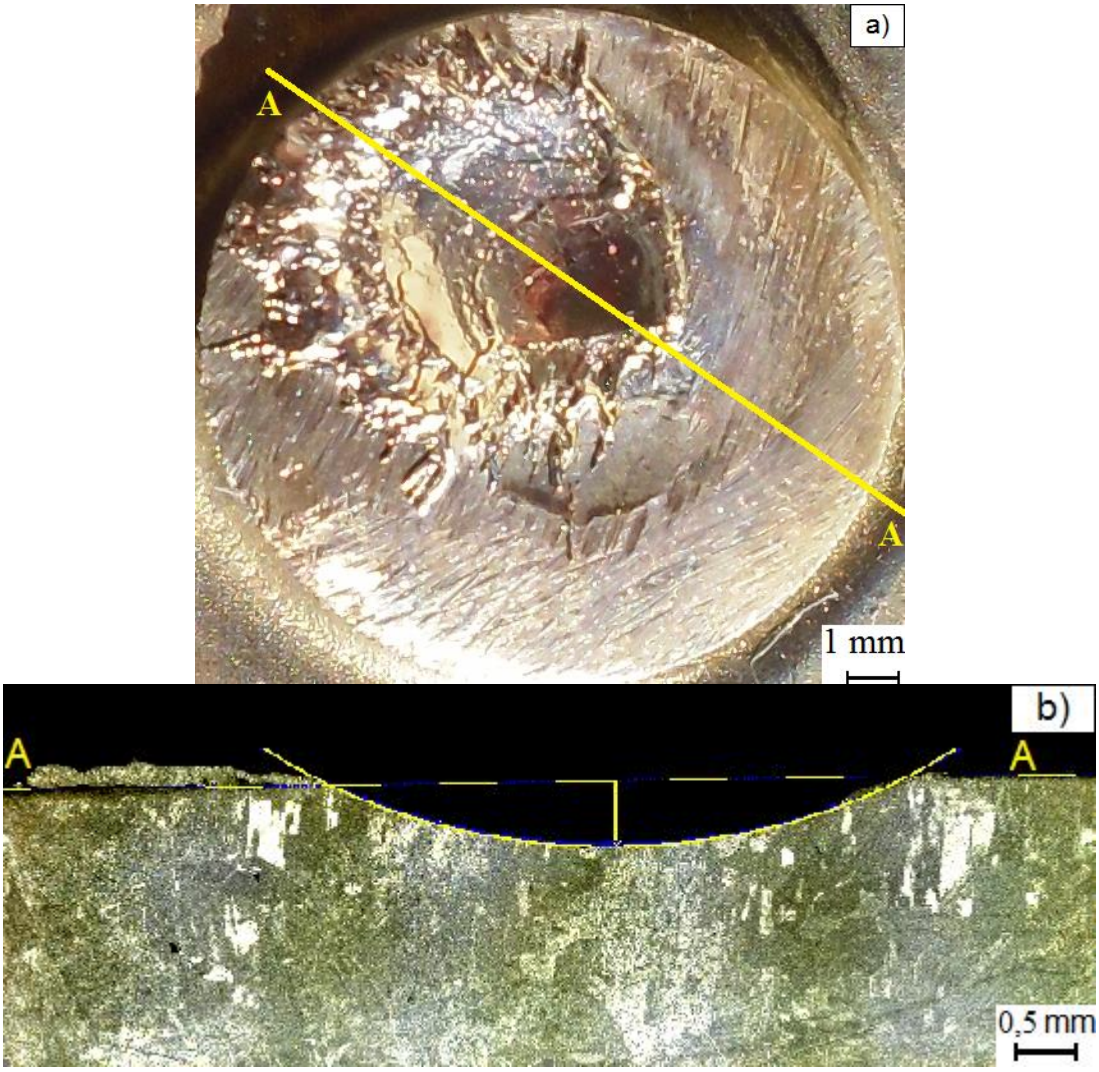

Figure 3. Etat de l'électrode argent après un arc (énergie pour I > 300 A : 560 J) :
a) en surface ; b) selon une coupe suivant la direction A-A

Pour l'électrode contenant du carbone (Figure 4), la dégradation semble par contre n'affecter qu'une couche superficielle de l'électrode, sur une épaisseur de 0,3mm.
Des grains entièrement constitués d'argent sont visibles en surface, indiquant une fusion puis une solidification du métal. Pour une profondeur plus importante, on n'observe pas de modification importante de la microstructure. Cependant, le diamètre de la zone où la surface présente un aspect granuleux, assez irrégulier est voisin de celui du cratère observé dans le cas de l'argent pur (environ 5 mm). Ce résultat est cohérent avec la forme de l'arc et en particulier la zone d'accrochage sur l'électrode, similaire dans les deux cas (Figure 1 et Figure 2).

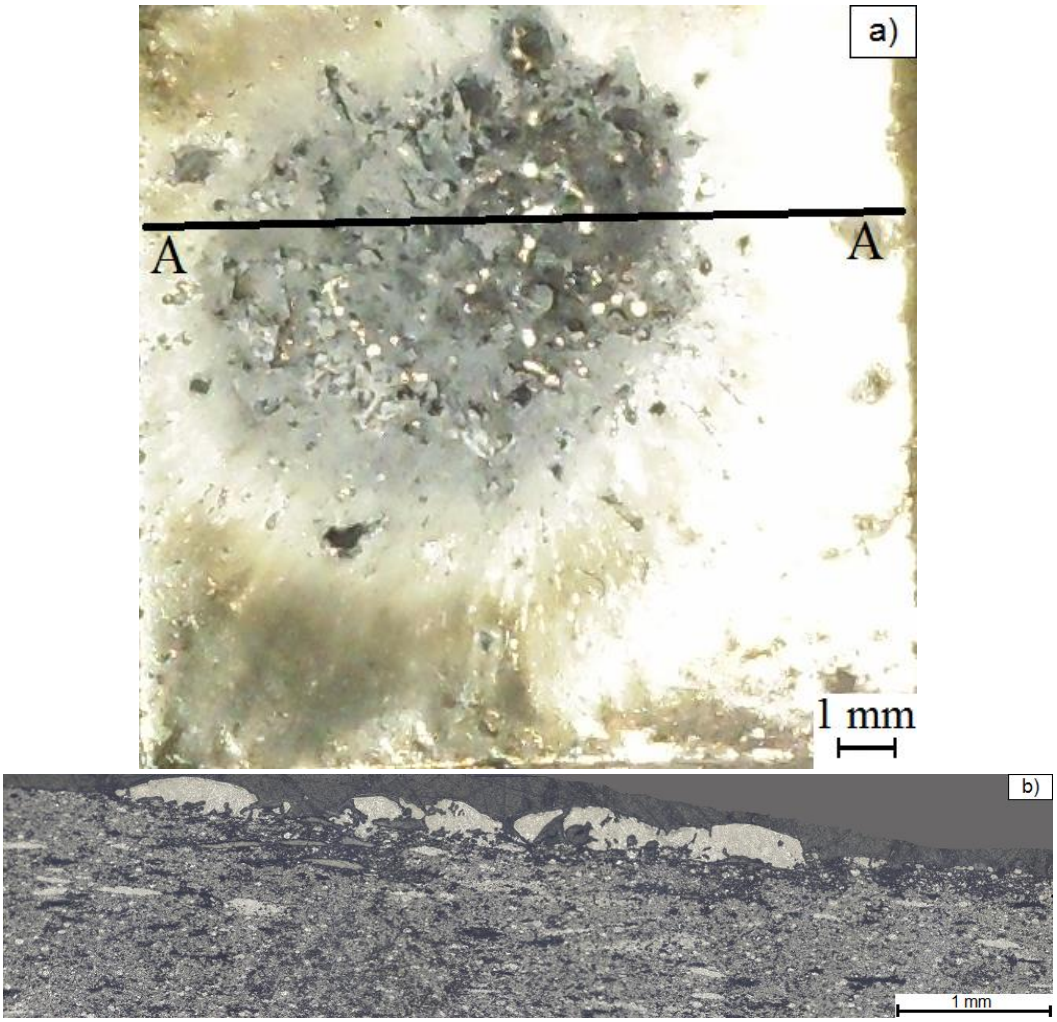

Figure 4. Etat de l'électrode en Ag + 1% en masse de carbone après un arc (énergie pour I > 300 A : 560 J) : a) en surface ; b) selon une coupe suivant la direction A-A

2.2. Etude spectroscopique

Les mesures réalisées montrent que les raies d'argent neutre Ag I sont fortement auto-absorbées lorsque l'érosion devient importante, et ce, même pour des courants faibles. Ainsi, par exemple pour un courant maximum de 300 A, la raie d'Ag I à 546 nm est auto-inversée à partir de 1,3 ms après le début de l'arc. En revanche, il a pu être montré que les raies d'argent ionisé une fois restaient exploitables plusieurs millisecondes après l'amorçage de l'arc. Les raies ioniques présentées dans le Tableau 1 possèdent des niveaux de transition d'énergie avec un écart jusqu'à 1,5 eV (raie à 553,32 nm et raie à 840,38 nm). Cela permet d'envisager une détermination de la température d'excitation avec une bonne précision en utilisant la méthode de Boltzmann. Sous réserve de valider l'équilibre thermodynamique local (ETL), cette température pourrait être associée à la température du plasma.

Dans le cas de l'anode contenant du carbone, la raie C I du carbone neutre à 9095 Å peut être observée au début de la décharge (jusqu'à t = 1,3 ms). Par contre, il n'a pas été possible d'observer le système de la bande de Swan C_2 (0,0), ce qui peut s'expliquer par la température importante de l'arc. Par ailleurs, des raies issues des éléments présents dans l'air (azote, oxygène, hydrogène) sont également exploitables.

λ(angström)	A_{ki} (s^{-1})	Précision	E_i (eV)	E_k (eV)	g_k
5543.2	2.10E+07	25%	15.81	18.05	7
5558.1	1.90E+07	25%	15.77	18.00	5
5573.8	3.20E+07	25%	15.81	18.03	9
5579.7	3.70E+07	25%	15.81	18.03	7
5610.6	4.00E+07	25%	15.82	18.03	9
5622.5	1.40E+08	25%	15.82	18.03	11
8005.2	3.80E+07	25%	14.94	16.49	7
8379.6	5.00E+07	25%	14.99	16.47	3
8403.8	4.70E+07	25%	14.94	16.42	9
8492.6	4.30E+07	25%	15.55	17.01	7

Tableau 1. Liste des raies d'argent ionisé Ag II observables dans l'arc : probabilité de transition A_{ki} et précision associée, énergie de départ E_i et d'arrivée E_k et poids statistique g_k (constantes issues de la base de donnée du NIST [6]) en fonction de la longueur d'onde λ.

Les raies d'azote neutre N I sont visibles sans présenter d'auto-inversion, ce qui n'exclut cependant pas la possibilité d'une auto-absorption non négligeable. Les raies d'azote ionisé une fois N II ne sont observables que pendant les premiers instants (t < 2 ms) de la décharge. De même, les raies d'oxygène neutre O I sont suffisamment intense pour être exploitées après plus de 2 ms, comme on peut le voir sur la Figure 5. Par contre les raies d'oxygène ionisé une fois O II ne sont visibles qu'aux premiers instants de la décharge.

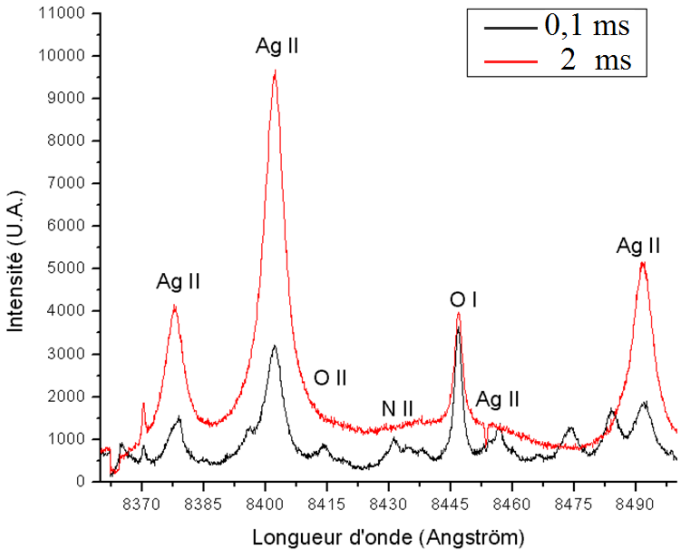

Figure 5. Spectre de l'arc entre 836,3 et 849,7 nm, h = 1 mm, visée au niveau de l'axe de la décharge

Conclusion

Les résultats montrent que l'érosion est nettement moins importante dans le cas de l'électrode contenant du carbone. La modification de la microstructure de l'électrode n'affecte qu'une couche superficielle, contrairement au cas de l'argent pur où la zone thermiquement affectée s'étend sur plusieurs millimètres. Cette influence du carbone peut s'expliquer par la

modification des propriétés (température de fusion, conductivité thermique) qui peut être significative même pour une faible proportion. La forme du carbone introduit (nanotubes) doit également être considérée, puisque les liaisons de type sp2 caractérisant le réseau graphénique conduisent à une température d'oxydation plus importante que le carbone amorphe. Cet élément peut donc rester présent dans l'anode pour une température plus élevée. En considérant les résultats existant dans la littérature pour des configurations similaires, on peut supposer que la température de l'arc est de l'ordre de 15000 K [7]. Les raies pouvant être observées dans cette étude (prévalence des raies ioniques et absence de bandes moléculaires) sont effectivement compatibles avec une température égale ou supérieure à cette valeur. La forte auto-inversion des raies d'argent neutre Ag I peut s'expliquer par une proportion importante de vapeurs métalliques dans le plasma, en particulier en périphérie de l'arc. En effet la température y étant plus faible l'absorption y est dominante.

Références

[1] J.W. McBride and P.M. Weaver (2001), Review of arcing phenomena in low voltage current limiting circuit breakers. IEE Proc.-Sci. Meas. Tech., 148-1, 1–7. Doi : 10.1049/ip-smt:20010185

[2] C. Brdys, D.Cajal, J.-P. Toumazet, F.Gary, A.Laurent and C. Arnoux (2010), Study of the arc behavior in low-voltage circuit breaker by means of optical and magnetic measurements. Eur. Phys. J. Appl. Phys., 49, 22904. Doi : 10.1051/epjap/2009150

[3] P. Ratovoson (2015) « Etude expérimentale d'un arc impulsionnel », Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III Paul Sabatier – France

[4] K.J. Wang, Q.P. Wang, (1991) Erosion of Silver-Base Material Contacts by Breaking Arcs. IEEE Transaction on Components Hybrids and Manufacturing Technology, 14, 293-297. Doi : 10.1109/33.87307

[5] F. Lago, J.J. Gonzalez, P. Freton and A. Gleizes, (2004), A numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: Part I. The two-dimensional model. J. Phys. D: Appl. Phys, 37, 883–897. Doi : 10.1088/0022-3727/37/6/013

[6] National Institute of Standards and Technology (N.I.S.T.) Atomic Spectra Database, http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html.

[7] Swierczynski B, Gonzalez J J, Teulet P, Freton P and Gleizes A (2004), Advances in low-voltage circuit breaker modelling, J. Phys. D: Appl. Phys., **37** pp 595–609. Doi : 10.1088/0022-3727/37/4/011