

Dimensionnement et réalisation d'un générateur à plasma d'arc à air de faible puissance (2 kW)

ABDERRAHMANE HALIS^{1,a}, BERNARD PATEYRON² ET MOHAMMED EL GANAOU²

¹ Laboratoire de Recherche QUERE, Qualité de l'Énergie dans les Réseaux Électriques, Département d'Électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Ferhat Abbas, 19000 Sétif, Algérie

² Université de Limoges, SPCTS UMR 66 38 CNRS (Sciences des Procédés Céramiques et Traitement de Surface), UMR 6638, Université de Limoges, 123 avenue Albert Thomas, 87060 Limoges Cedex, France

Reçu le 6 avril 2011, accepté le 7 avril 2011

Résumé – Une torche plasma d'arc à air de moins de 2 kW a été conçue et réalisée dans le laboratoire de recherche QUERE de l'université de Sétif (Algérie). Elle est conçue afin de satisfaire tous les besoins qui imposent l'usage d'une flamme plasma : soudage, découpage, rechargement de métaux, traitement thermique de surface, veilleuse de chaudière d'incinération, chauffage de gaz, etc. C'est en outre une maquette des torches de même conception mais de puissances plus élevées. Versatile, elle permet ainsi d'étudier les torches à électrodes concentriques et celles à électrodes puits dans de nombreuses configurations originales. Une description de ce générateur à plasma d'arc est présentée ainsi que les résultats des premiers essais expérimentaux à puissance réduite. Les transferts de chaleur et de masse dans la torche sont également identifiés pour être quantifiés par simulation numérique.

Mots clés : Plasma thermique / torche plasma d'arc / plasma d'air

Abstract – **Dimensioning and realization of a low power air plasma arc generator (2 kW)**. An air plasma arc torch less than 2 kW was designed and constructed in the research laboratory QUERE of Setif University (Algeria) to meet all the needs that require the use of a plasma torch: welding, cutting, reloading metal surface treatment, pilot incineration burner, heating gas, etc. It is also a model of torches with the same concept but higher powers. It will also allow studying concentric electrodes plasma torches and hollow electrodes in many original configurations. A description of this generator plasma is presented with the results of the first experimental tests at reduced power. Heat and mass transfer are also identified to be quantified by using a numerical simulation approach.

Key words: Thermal plasma / arc plasma torch / air plasma

1 Introduction

La projection plasma qui est un cas particulier de la projection thermique, qui regroupe l'ensemble des procédés dans lesquels des matériaux sous forme pulvérulente sont déposés dans un état fondu ou semi-fondu sur des substrats. Introduite au début du siècle dernier (1909), la projection thermique s'est développée dans un premier temps d'une façon empirique et coûteuse limitant son usage aux domaines aérospatial, nucléaire et militaire. Depuis, la recherche fondamentale (compréhension des mécanismes) et les travaux technologiques sur la qualité et la reproductibilité du dépôt ainsi que la diminution du coût de production ont permis d'élargir la fenêtre des

applications et d'intégrer des aspects sociétaux (automobile, énergie, outillage, etc.). Cette technique représente actuellement un chiffre d'affaire de plus de cinq milliards d'euros pour les sociétés consacrées à la projection thermique et au moins la même somme pour les activités intégrées dans les entreprises.

La projection plasma fait désormais partie des outils couramment utilisés en recherche et développement pour résoudre de nombreux problèmes d'ingénierie des surfaces et interfaces (résistance à l'usure et à la corrosion, isolation thermique et électrique, ...) ce qui impose des couplages de disciplines et des études fondamentales [1–5].

En particulier, les torches vortex à plasma d'air soufflé ont été développées dès le début des années 1980 pour des besoins de traitements chimiques, des besoins en

^a Auteur pour correspondance : halis_abd@yahoo.fr

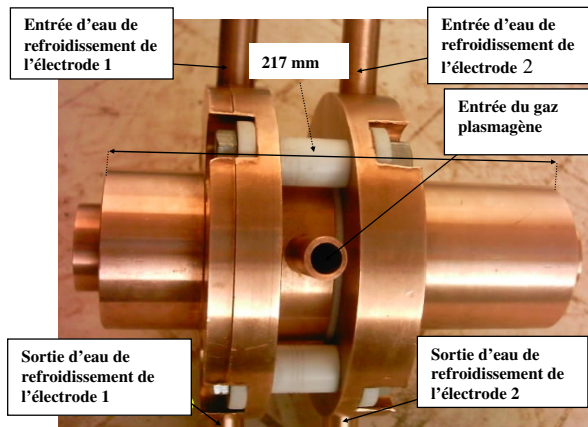


Fig. 1. Vue de la torche à plasma du QUERE.

siderurgie et en métallurgie ou encore des besoins d'essais thermiques [1]. Celles proposées pour le traitement des déchets sont de type arc soufflé (adaptés au traitement des liquides et des gaz), ou de type arc transféré (adaptés au traitement des solides et des liquides) [6]. Citons quelques exemples d'applications exploitées ou étudiées :

- La destruction de déchets chimiques et plus particulièrement les déchets organohalogénés (PCB) [2]. Westinghouse injecte les déchets dans une torche vortex alimentée en air et montée sur un réacteur de pyrolyse. Pour les PCB, un taux de destruction atteignant 99,99 % est obtenu [7, 8].
- L'incinération de déchets spéciaux tels certains déchets hospitaliers contaminés [9, 10].
- L'inertage des déchets très réfractaires contenant de l'amiante (isolants thermiques, joints hautes températures, etc.) [11, 12].
- La production de silicium photovoltaïque [13] et valorisation de déchets d'aluminium.

Ce travail présente la conception et la réalisation d'une torche plasma d'air soufflé généré par l'arc électrique créé entre deux électrodes cylindriques. Cette torche a été conçue afin de constituer le cœur d'un incinérateur de destruction à haute température de déchets toxiques. En effet le stockage de ceux-ci, parmi eux les PCB, est en principe interdit. Ces matières, qui existent sur le territoire algérien, doivent donc être détruites.

Pour des raisons pratiques de disponibilité matérielle cette torche conçue pour des régimes de fonctionnement de l'ordre de 50 kW a été testée à très faibles puissances voisines de 2 kW. Dans ces conditions où elle donne totale satisfaction, elle peut être utilisée en maquette de torches de même conception mais de puissances plus élevées.

2 Construction de la torche à plasma

La vue globale et la vue éclatée de ce générateur à plasma d'arc sont données sur les figures 1 et 2.

La torche à plasma est constituée de deux électrodes de cuivre cylindriques coaxiales séparées par un espace

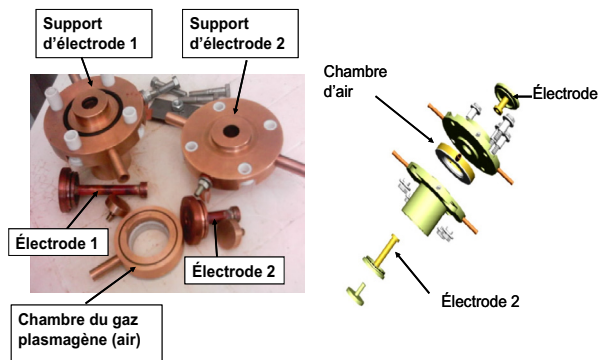


Fig. 2. Éclaté de la torche à plasma du QUERE.

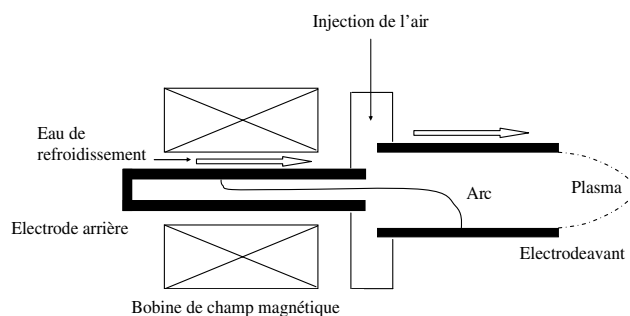


Fig. 3. Représentation schématisée de la première configuration de la torche à plasma. La bobine magnétique enveloppe la cathode creuse.

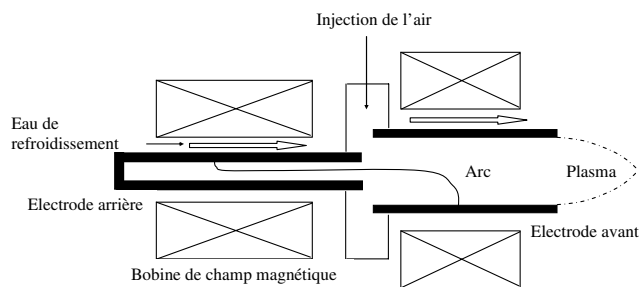


Fig. 4. Schéma de la deuxième configuration de la torche à plasma. Chaque électrode est enveloppée d'une bobine magnétique.

d'alimentation en gaz plasmagène, ici de l'air [14]. Lequel est fourni par un compresseur.

La chambre d'injection d'air (voir Fig. 2) est alimentée par quatre orifices identiques et équidistants, tangentiels à la périphérie de la chambre d'air. Ainsi se constitue un tourbillon dans l'espace inter électrodes.

L'arc s'allonge sous l'effet de l'écoulement d'air et s'accroche sur les faces internes des électrodes. La tension élevée permet des courants d'arc relativement faibles pour une puissance d'entrée donnée. Les électrodes sont refroidies par circulation d'eau afin de réduire leur érosion.

Cette torche fonctionne en mode soufflé et des électrodes cylindriques de diamètres et de longueurs différents permettent de l'exploiter de manières très versatiles, comme il est montré dans la figure 3, avec les

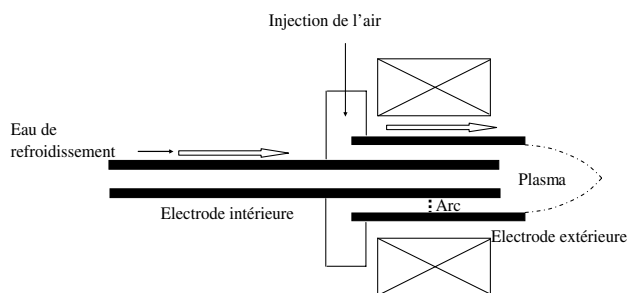


Fig. 5. Schéma de la troisième configuration de la torche à plasma. La cathode pénètre dans l'anode et une bobine magnétique enveloppe l'anode.

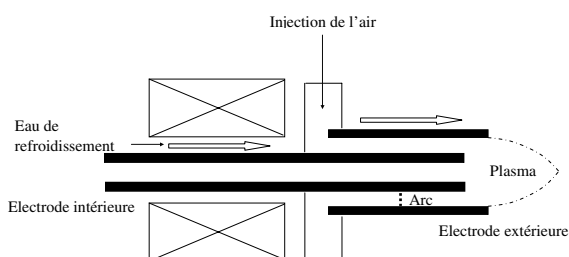


Fig. 6. Schéma de la quatrième configuration de la torche à plasma. La cathode pénètre dans l'anode et une bobine magnétique enveloppe la cathode.

configurations des figures 3 et 4, le diamètre intérieur de l'électrode avant peut varier de 8 mm à 16 mm et sa longueur peut être de 70 mm ou 120 mm. L'électrode arrière peut être de longueur 35 mm, 50 mm, 70 mm, 85 mm, 100 mm ou 120 mm. Ce générateur permet aussi l'étude des torches plasmas à électrodes concentriques comme présenté dans les figures 5 et 6. Le diamètre extérieur de l'électrode intérieure est de 14 mm et le diamètre intérieur de l'électrode extérieure varie entre 16 mm et 20,5 mm.

3 Alimentation électrique de la torche

Le comportement de l'arc est fortement influencé par de nombreux paramètres tels que la nature des électrodes et celle du gaz plasmagène et aussi les transferts avec l'écoulement environnant, eux-mêmes régis par la géométrie de la torche et le débit de gaz plasmagène. De façon schématique, l'arc a tendance à se comporter naturellement comme un court-circuit.

Comme la tension d'arc est fonction de sa longueur, le caractère dynamique du mouvement du pied d'arc et les changements de la longueur d'arc doivent être pris en compte dans la conception de l'alimentation électrique, puisque celle-ci devra répondre aux fluctuations extrêmement rapides de celle-ci. Une alimentation triphasée de faible puissance a été utilisée temporairement pour des tests préliminaires. Cette alimentation est constituée d'un convertisseur statique de six diodes au

silicium montées en pont sur des plaques de refroidissement. Elle alimente la torche à une résistance variable et une inductance. L'inductance assure une excellente stabilité de l'arc.

4 Système de refroidissement

Le gaz plasmagène participe en partie à la fonction de refroidissement. Les conditions aux points d'accrochages d'arc sont sévères et des flux thermiques très élevés sont produits. C'est pourquoi un système de refroidissement par eau à haute pression et grande vitesse sera utilisé. En effet le flux de chaleur évacuée par l'eau de refroidissement augmente avec la vitesse de celle-ci.

Le refroidissement des électrodes est assuré par le réseau d'eau courante. Un réservoir (de 150 l) alimente une pompe à eau dont le débit est contrôlé par une vanne. Le système de refroidissement fonctionne en circuit fermé et l'eau revient dans le réservoir après son passage sur les deux électrodes de la torche.

5 Alimentation de la torche par l'air

L'alimentation en air de la torche est assurée par un compresseur. L'air plasmagène est injecté tangentiellement dans l'espace libre entre les deux électrodes ce qui facilite la rotation des pieds d'arc sur la surface interne des électrodes. En outre, en raison de la traînée aérodynamique, les pieds d'arc oscillent également dans l'axe de la torche. Un champ magnétique est appliqué, en plus des forces aérodynamiques, afin d'augmenter ces effets et améliorer la durée de vie des électrodes.

6 Étude expérimentale

Le premier test est effectué dans la configuration de la figure 7. La résistance du rhéostat est ajustée à 30 Ω , l'inductance est de 160 μH et la tension à vide est de 450 V. L'électrode avant de la torche a une longueur de 70 mm et un diamètre intérieur de 10 mm. Le diamètre intérieur de l'électrode arrière est de 8 mm et sa longueur est de 85 mm. La pression d'alimentation d'air est réglée à 0,1 bar. Une bobine de champ de 1270 tours est utilisée autour de l'électrode arrière, et une autre de 1170 tours autour de l'électrode avant. Le courant injecté dans la bobine est de 1 A. Le sens du champ dans la bobine est choisi de telle façon que la force aérodynamique du gaz plasmagène et la force électromagnétique agissent de façon coopérative sur l'arc électrique. Un jet de plasma stable est obtenu. Le courant d'arc est 10 A et la tension d'arc est 60 V.

Le deuxième test est réalisé avec la configuration suivante. La résistance du rhéostat est ajustée à 27 Ω et l'inductance de 160 μH , la tension à vide est de 450 V. L'électrode avant de la torche a une longueur de 120 mm et un diamètre intérieur de 8 mm. Le diamètre intérieur

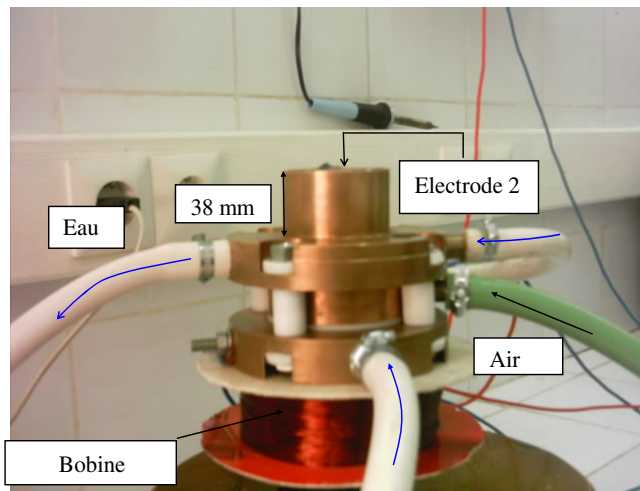


Fig. 7. Photographie de la torche.

de l'électrode arrière est de 8 mm et sa longueur est de 85 mm. La pression de l'air est réglée à 0,1 bar. Une bobine de champ de 1270 tours est utilisée au niveau de l'électrode arrière. Le courant injecté dans la bobine est de 1 A. Le sens du champ dans la bobine est choisi de telle façon que la force aérodynamique du gaz plasmagène et la force électromagnétique agissent sur l'arc électrique, dans le même sens. Un jet de plasma stable est obtenu. Le courant d'arc est de 9,5 A et la tension de 45 V.

Une étude est faite de l'influence du champ magnétique sur le fonctionnement de la torche. La configuration utilisée est la suivante figure 7. Une inductance de stabilisation de 62Ω , $L = 197 \text{ mH}$ est insérée dans le circuit d'alimentation de la torche. La pression de l'air est réglée à 0,1 bar. Une bobine de champ de 1270 tours est utilisée au niveau de l'électrode arrière. Dans cet essai le courant injecté dans la bobine est de 0 A. Un jet de plasma stable très long est obtenu comme il est montré sur figure 8. Le courant d'arc varie entre 14 A et 17 A et sa tension entre 80 V et 130 V respectivement.

Dans un autre essai le courant injecté dans la bobine est de 1 A. Le sens du champ dans la bobine est choisi de telle façon que la force aérodynamique du gaz plasmagène et la force électromagnétique agissent dans le même sens sur l'arc électrique. Un jet de plasma stable plus court est obtenu comme il est montré sur la figure 10. Le courant d'arc varie entre 18,5 A et 20 A et la tension respectivement entre 78 V et 61 V.

Dans le dernier essai le courant injecté dans la bobine est de 1 A. Le sens du champ dans la bobine est choisi de telle façon que la force aérodynamique du gaz plasmagène et la force électromagnétique agissent sur l'arc électrique de façon opposée. Un jet de plasma stable est obtenu comme il est montré sur la figure 7, il est plus long que le précédent mais plus court que le premier (voir Fig. 8) le courant d'arc varie entre 18 A et 21,5 A et la tension respectivement entre 92 V et 35 V.

L'ensemble des points de fonctionnement tension-courant des tests réalisés est représenté sur la figure 9, il est visible que ces points sont distribués sur une

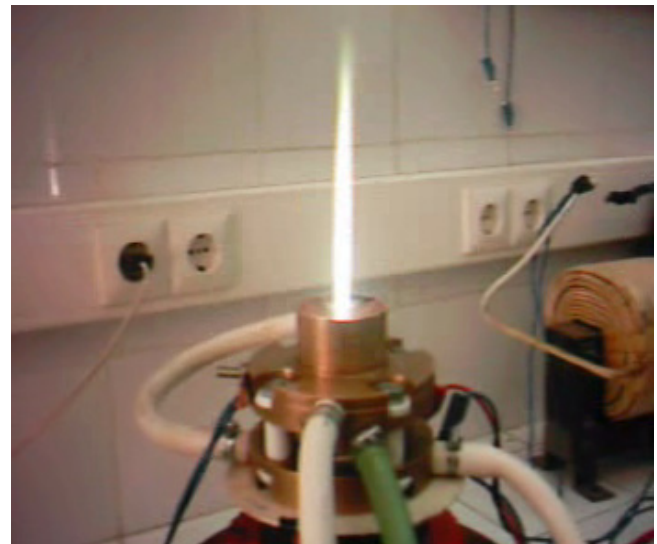


Fig. 8. Photographie du développement du jet de plasma de la torche. Le courant injecté dans la bobine est de 0 A.

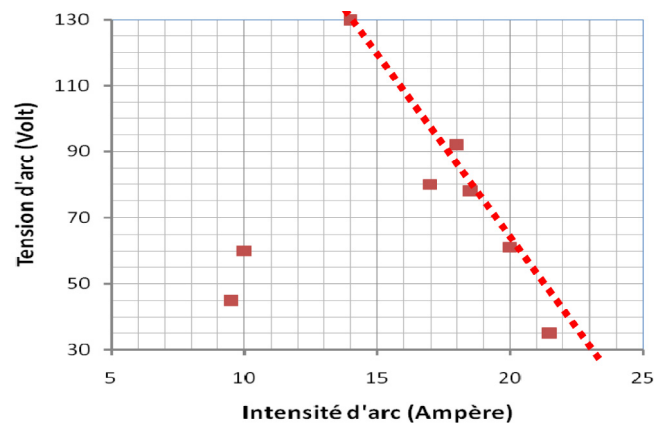


Fig. 9. Points testés de la caractéristique courant-tension de la torche QUERE. La droite de régression montre que vers 10 A le régime d'arc diffère.

caractéristique tension-courant tombante ainsi que le prévoit Brillhac et al. [15, 16]. La droite de régression montre que vers 10 A le régime d'arc est différent.

L'analyse dimensionnelle prévoit, selon Brillhac et al. [15] une relation du type

$$N\nu = KNi^a \quad (1)$$

entre les nombres Ni et $N\nu$ définis ci-dessous :

$$Ni = \frac{I^2}{\sigma_0 G h_0 d} \quad \text{et} \quad N\nu = \frac{U d \sigma_0}{I}$$

avec σ_0 : conductivité électrique (pour l'air à T_0 , $\sigma_0 = 1676,8 \text{ A}^2 \cdot \text{s}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ [18])

h_0 : enthalpie massique (pour l'air à T_0 , $h_0 = 1,16254 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ [18])

T_0 : température caractéristique telle que la concentration en électrons dans le gaz atteigne un seuil arbitrairement fixé (si ce seuil est 1 % $T_0 = 9100 \text{ K}$ [18])

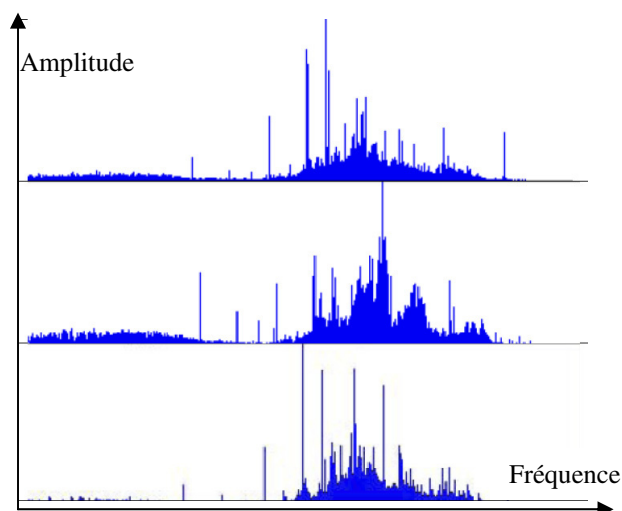


Fig. 10. Spectres de Fourier du bruit acoustique de la torche QUERE de 1 Hz à 32 kHz dans les trois conditions expérimentées en fonction de l'absence de champ magnétique (spectre du haut) et du sens de celui-ci, coopérant à la rotation hydrodynamique sur le spectre médian et la contrariant sur le spectre du bas.

Tableau 1. Relations semi empiriques obtenues pour le fonctionnement des torches de même type Aéropatiale, EDF(SPCTS) et QUERE selon l'équation (1).

Torche	Puissance	a
Aéropatiale	2 MW	-0,751
SPCTS Limoges FR	150 kW	-0,612
QUERE Sétif AL	2 kW	-0,475

G : débit masse total des gaz plasmagènes ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)

d : diamètre interne de l'anode (m)

I : Intensité du courant (A)

U : Tension électrique (V).

À partir des données expérimentales excluant les intensités voisines de 10 A, un coefficient a est obtenu tel que $a = -0,475$. Ce coefficient est comparé à ceux des torches de même type sur le tableau 1. Il semble cohérent avec la diminution de la valeur absolue de a avec la puissance dissipée dans la torche.

Le signal acoustique de la torche est enregistré de 1 Hz à 32 kHz et traité par transformée de Fourier [13]. La figure 10 montre que les spectres avec ou sans champ magnétique se ressemblent et présentent les mêmes raies principales que le spectre du haut. Il semble que l'amplitude du spectre de bruit augmente, particulièrement à basse fréquence, quand le champ magnétique coopère avec la rotation aérodynamique et que ce spectre de bruit s'atténue quand le champ magnétique contrarie la rotation aérodynamique.

7 Conclusion

Après la conception suivie de la réalisation de la torche à plasma, une étude expérimentale a été menée sur ce

générateur à plasma. Les tests effectués sur la torche ont montré que son fonctionnement est stable. Des jets de plasma sont obtenus pour les deux configurations de la torche, en dépit du faible courant d'alimentation actuellement disponible. La puissance de la torche est très faible et varie entre 427,5 W et 1921 W (environ 2 kW). L'utilisation des bobines de champ diminue la tension d'arc et rend celui-ci plus stable. Elles peuvent être utilisées pour déplacer le pied d'arc sur la surface interne des électrodes et ainsi augmenter l'aire d'érosion et ainsi prolonger leur durée de vie.

Références

- [1] P. Fauchais, J.F. Coudert, B. Pateyron, La production de plasmas thermiques, *Rev. Gén. Therm.* 35 (1996) 543–560
- [2] N. Laraqi, Thermal impedance and transient temperature due to a spot of heat on a half-space, *Int. J. Therm. Sci.* 49 (2010) 529–533
- [3] N. Laraqi, Compact and accurate approximants to determine the transient current at the disc electrode under different boundary conditions, *Electrochim. Acta* 56 (2011) 2877–2880
- [4] Belghazi, M. El Ganaoui, J.C. Labbe. Analytical solution of unsteady heat conduction in a two-layered material in imperfect contact subjected to a moving heat source, *Int. J. Therm. Sci.* 49 (2010) 311–318
- [5] N. Laraqi, M. El Ganaoui, Phénomènes de constriction thermique durant le procédé de dépôt par projection plasma. Actes du Congrès Français de Thermique. Thermique Aéronautique et Spatiale, ISBN 978-2-84088-210-7, tome 1 (2008) 71–76
- [6] F. Kassabji, B. Pateyron, J. Aubreton, M. Boulos, P. Fauchais, Conception d'un four à plasma de 0,7 MW pour la réduction des oxydes de fer, *Rev. Int. Hautes Temp. Réfract.* 18 (1981)
- [7] K.R. Bruce, J. Lee, D. Freed, L. Heredy, Evaluation of plasma – based thermal treatment system for destruction of difficult to remediate waste, *International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies*, Salt Lake City, USA, 1998, pp. 559–564
- [8] J. Aubreton, B. Pateyron, P. Fauchais, Les fours à Plasma, *Rev. Int. Hautes Temp. Réfract.* 18 (1981) 293
- [9] B. Pateyron, G. Delluc, J. Erin, M.F. Elchinger, P. Fauchais, Calcite fluidized bed reactor heated by argon-hydrogen plasma for destruction of carbofluorine, wastes *Proc. of the 12th ISPC*, Minneapolis (USA), 1995, Conference Proceedings ed. Prof J. Heberlein, 6 pages
- [10] P. Fauchais, A.M. Vardelle, J.F. Coudert, B. Pateyron, State of the art in the field of plasma spraying and of extractive metallurgy with transferred arc: modelling, measurement, comparison between both, applications and developments, *Pure Appl. Chem.* 57 (1985) 1171–1178

- [11] M.D. Springer, T. Barkley, O. Castellon, B. Forsberg, G. Stutts, A thermal destruction and recovery process for medical waste powered by a thermal plasma arc torch, International Symposium on Environmental Technologies, Atlanta, USA, 1995, pp. 671–682
- [12] B. Guihard, Industrial and environmental applications of non transferred plasma, International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies, New Orleans, USA, 2002
- [13] C. Alemany, C. Trassy, B. Pateyron, K.-I. Li, Y. Delannoy Refining of metallurgical-grade silicon by inductive plasma, Solar Energy Materials and Solar Cells 72 (2002) 41–48
- [14] A. Halis, Étude et réalisation d'un générateur à plasma, Thèse de Doctorat es sciences en électrotechnique, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, 2007
- [15] J.F. Brillhac, B. Pateyron, P. Fauchais Investigation of the thermal characteristics of d.c. vortex plasma torches High Temp. Chem. Processes 3 (1994) 419–425
- [16] J.F. Brillhac, B. Pateyron, J.F. Coudert, P. Fauchais, A. Bouvier Study of the dynamic and static behavior of DC vortex plasma torches : Part 2 : Well-type cathode Plasma chemistry and plasma processing 15 (1995) 231–255
- [17] D. Rigot, G. Delluc, B. Pateyron, J.F. Coudert, P. Fauchais, J. Wigren, Transient evolution and shifts of signals emitted by a DC plasma gun (type PTF4) High Temp. Mat. Processes 2 (2003) 175–185
- [18] B. Pateyron, G. Delluc, N. Calvé, T.T. Winner, la chimie et les propriétés de transport en ligne, dans l'intervalle de 300 K à 20 000 K, Mécanique & Industries 6 (2006) 651–654