

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

Etude d'un arc impulsionnel immergé à l'aide de deux dispositifs expérimentaux

T. Tmenova, F. Valensi, A. Veklich, Y. Cressault, V. Boretskij,
K. Lopatko, Y. Aftandilyants



ISSN : 2428-8500

DOI : 10.18145/jitipee.v3i1.159

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.

Etude d'un arc impulsif immergé à l'aide de deux dispositifs expérimentaux

Tetiana Tmenova^(1,2), Flavien Valensi⁽²⁾, Anatoly Veklich⁽¹⁾, Yann Cressault⁽²⁾,
Viacheslav Boretskij⁽¹⁾, Kostiantyn Lopatko⁽³⁾, Yevgeniy Aftandilyants⁽³⁾

⁽¹⁾ Taras Shevchenko National University of Kyiv; Faculty of Radio Physics, Electronics
and Computer Systems; 64, Volodymyrs'ka st., Kyiv, Ukraine

⁽²⁾ Université de Toulouse; UPS, INPT; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion
d'Energie); 118 route de Narbonne, F-31062, Toulouse Cedex 9, France

⁽³⁾ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine; 15, Heroyiv
Oborony st., Kyiv, Ukraine

tetiana.tmenova@laplace.univ-tlse.fr

Résumé – Cet article présente les résultats de travaux expérimentaux visant à étudier un plasma formé par une décharge électrique immergée entre des copeaux de cuivre. Deux dispositifs expérimentaux ont été utilisés : une unité technologique permettant la synthèse de solutions métalliques colloïdale, et un dispositif permettant une étude plus académique où une décharge individuelle est amorcée entre deux électrodes de cuivre. Dans les deux cas les électrodes sont immergées dans l'eau. La température et la densité électronique ont été déterminées par spectroscopie optique d'émission.

Mots clés : arc impulsif immergé, décharge électrique, nanoparticules métalliques, cuivre, spectroscopie, imagerie rapide

DOI : 10.18145/jitipee.v3i1.159

Introduction

Ces dernières décennies, beaucoup d'efforts ont été entrepris pour développer des méthodes de production de nanoparticules de tailles et de morphologies différentes. De nombreux travaux scientifiques sont dédiés à la caractérisation et les applications des nanoparticules mais seulement quelques études traitent des mécanismes de formation des particules. En conséquence les concepts théoriques qui décrivent les processus de croissance des particules sont très rares et les quelques modèles existants sont difficilement capables d'expliquer l'influence des paramètres de synthèse sur la distribution finale en taille des particules et leurs propriétés. Ainsi les travaux qui permettent une meilleure compréhension de ces relations sont d'un grand intérêt scientifique [1].

Les propriétés exceptionnelles des nanoparticules métalliques permettent de les utiliser pour différents usages, notamment comme éléments de fertilisants minéraux [2]. Parmi les différentes méthodes de synthèse, la dispersion par décharge d'arc électrique d'un matériau conducteur est l'une des plus prometteuses pour obtenir des nanoparticules correspondant à l'objectif recherché, c'est à dire obtenir des matériaux biofonctionnels à l'échelle nanométrique. Avec la méthode utilisée, les nanoparticules sont synthétisées sous la forme de solutions colloïdales métalliques. Celles-ci sont des systèmes diphasiques finement dispersées composées d'un milieu de dispersion et d'une phase dispersée dont les particules ont une taille comprise entre 1 et 100 nm. Ce type de méthode est très efficace, relativement bon marché et satisfait aux exigences de problématiques appliquées et d'études scientifiques. L'objectif de ce travail est ainsi de contribuer au développement de cette technique de synthèse et d'étudier les particularités des décharges immergées.

1. Dispositif expérimental

Dans ce travail, des décharges électriques pulsées sont mise en œuvre pour deux configurations expérimentales basées sur un générateur impulsionnel utilisant un banc de condensateurs et des électrodes en cuivre immergées dans l'eau :

- un premier dispositif (appelé dispositif 1), conçu à l'Université Nationale de la Vie et des Sciences Environnementales d'Ukraine (Kiev), correspond à une unité opérationnelle de synthèse de solutions métalliques colloïdales (Figure 1a). Il est constitué d'un générateur pulsé (1), d'une unité de contrôle (2) et d'une chambre de décharge (3) avec des hublots en quartz. Il est instrumenté au moyen d'une bobine de Rogowsky (4) pour la mesure du courant et d'un pont diviseur (dont la résistance est suffisamment importante pour ne pas perturber la mesure de courant) pour la mesure de la tension (5), les données étant enregistrées au moyen d'un oscilloscope (6). Les paramètres expérimentaux typiques sont une tension U_0 jusqu'à 300 V, un courant jusqu'à 600 A et une capacité de 1300 μF . Les essais ont été réalisés avec des copeaux de cuivre. L'émission du plasma est enregistrée dans la gamme spectrale 440-900 nm via un spectromètre compact à grande ouverture (SDH-IV, Solar Laser Systems) équipé d'un détecteur CCD Toshiba TCD 1304 AP directement placé devant la paroi de la chambre de décharge.
- un second dispositif (appelé "dispositif 2"), développé au laboratoire LAPLACE de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier (France) est une configuration simplifiée d'une décharge électrique immergée, permettant jusqu'à 8 décharges consécutives (Figure 1b). Il se compose d'un générateur pulsé (I), d'un dispositif de synchronisation (II), d'un support (III) permettant de positionner les électrodes en cuivre (l'une fixe, l'autre pouvant se déplacer) et d'une cuve en pyrex (IV) remplie d'eau. Le courant est mesuré au moyen d'une sonde à bobine de Rogowsky (V), les données étant enregistrées au moyen d'un oscilloscope (VI). La tension maximale de charge U_0 est de 430 V pour la capacité de 1000 μF et un courant maximal de 4 kA. Le délai minimal entre deux impulsions est de 1 ms.

Les essais effectués avec le dispositif 2 sont réalisés en mode "simple décharge" pour différentes tensions maximales (U_0 jusqu'à 110 V, pour un courant I_{max} jusqu'à 480 A). Le diagnostic spectroscopique est réalisé au moyen d'un monochromateur Acton SpectraPro SP-2750 (VII) équipé d'une caméra EMCCD ProEM 1024 (Princeton Instrument). Il permet

l'acquisition de spectres résolus en temps (0,5 ms). Le montage optique (Figure 1b) est constitué d'un miroir (M1) et de deux lentilles (L1 et L2), permettant d'observer l'arc par au-dessus. L'arc est également observé au moyen d'une caméra rapide (VIII) Photron Fastcam AX100, l'acquisition étant synchronisée au déclenchement de l'arc. Deux filtres interférentiels ont été utilisés pour étudier qualitativement la composition du plasma, l'un étant centrés à 510 nm et l'autre à 780 nm. Ils permettent, respectivement, de sélectionner des gammes de longueur d'onde où ne sont présentes que des raies du cuivre neutre Cu I et des raies d'oxygène neutre O I.

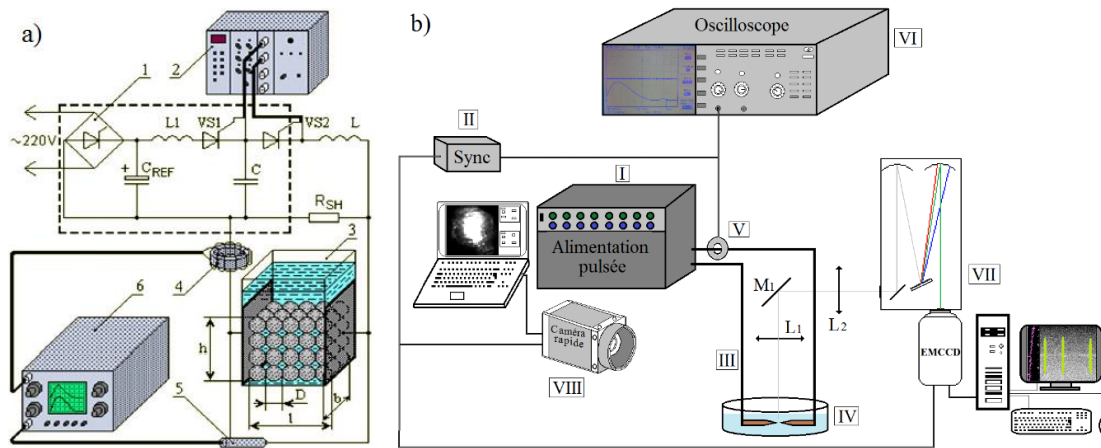


Figure 1. Dispositif expérimental (a) dispositif 1 à Kiev ; (b) dispositif 2 à Toulouse (la description détaillée des éléments de chaque dispositifs et donnée dans la section 2)

Pour les deux dispositifs expérimentaux la température d'excitation atomique de la décharge est obtenue par la méthode de Boltzmann [3], appliquée aux raies du cuivre neutre Cu I (456,1 ; 510,5 ; 515,3 ; 521,8 ; 570,0 ; 578,2 ; 793,3 et 809,2 nm (dispositif 1) et 510,5 ; 515,3 et 521,8 nm (dispositif 2). Les durées de vie des niveaux supérieurs des raies Cu I utilisées pour le calcul de la température [4] restent très inférieures ($5 \text{ à } 24 \cdot 10^{-9} \text{ s}$) devant la durée des impulsions, pour les deux dispositifs ($1 \cdot 10^{-4}$ et $2 \text{ à } 3 \cdot 10^{-4} \text{ s}$, respectivement). Par ailleurs les raies ont été choisies pour avoir une distribution des niveaux suffisamment étalée en énergie (supérieure à 2 eV).

La température d'excitation a été calculée sur la base de l'hypothèse que les niveaux d'énergie supérieurs des transitions atomiques choisies sont en équilibre thermodynamique local, ce qui signifie que les densités de population de ces niveaux suivent la loi de Boltzmann. Ceci permet d'appliquer la méthode classique du graphe de Boltzmann pour déterminer la température selon l'équation (1) :

$$\ln \left(\frac{I_{ij} \lambda}{f_j g_j} \right) = -\frac{E_i}{kT} + C_1 \quad (1)$$

où I_{ij} est l'intensité relative de la raie d'émission entre les niveaux i et j , λ sa longueur d'onde, g_j la dégénérescence ou le poids statistiques du niveau inférieur j de la transition considérée et f_j la force d'oscillateur du niveau inférieur ; E_i est l'énergie d'excitation du niveau i ; k est la constante de Boltzmann et C_1 est un terme constant. Ainsi les points correspondant à chaque raie spectrale Cu I choisie pour le diagnostic auront pour coordonnées $\left(\ln\left(\frac{I_{ij}\lambda}{f_j g_j}\right), \frac{E_i}{k}\right)$, ce qui constituera une courbe correspondant à une relation linéaire (droite de Boltzmann) dont la pente a est égale à $-\frac{1}{kT}$.

Dans les deux cas, la mesure de l'élargissement de la raie de Balmer H_α est utilisée pour déterminer la densité électronique n_e , selon la procédure décrite dans [3]. Un lissage par profil de Voigt est appliqué puis l'élargissement Stark est obtenu en déconvoluant la partie gaussienne (élargissement Doppler et fonction d'appareil). Finalement, n_e est obtenue d'après l'équation (2) :

$$n_e = C(n_e, T_e) \cdot (\Delta\lambda_s)^{3/2} \quad (2)$$

où $C(n_e, T_e)$ est le coefficient utilisé pour déterminer la densité électronique à partir de la largeur des profils Stark des raies spectrales de l'hydrogène ou de raies présentant un comportement similaire ; $\Delta\lambda_s$ désigne la largeur du profil Stark de la raie spectrale, définie par la largeur à mi-hauteur (FWHM) obtenue à partir de la déconvolution du profil de Voigt. Les valeurs des coefficients $C(n_e, T_e)$ pour l'élargissement Stark des raies d'hydrogène sont calculés par interpolation des valeurs des mi-largeurs $\Delta\lambda_s$ tabulées par Griem [5], qui correspondent aux températures et aux densités électroniques de la raie de Balmer H_α de $10 \cdot 10^3$ à $40 \cdot 10^3$ et 10^{16} à 10^{18} cm^{-3} , respectivement. Sur la base d'une première estimation de la densité électronique une valeur de départ est définie pour le coefficient $C(n_e, T_e)$, puis la densité est calculée. Il est à noter que sur la plage de valeurs considérée, le coefficient dépend surtout de la température et peu de n_e .

2. Résultats

La température et la densité électronique mesurées en utilisant le dispositif 1 à fort courant (de l'ordre de 800 A) sont présentées dans le Tableau 1, en fonction de l'intensité des raies du cuivre (les résultats ont été classés en trois groupes selon le niveau d'émission des raies du cuivre enregistrées, de valeur relative croissante).

Intensité de l'émission de Cu I	n_e (10^{17} cm^{-3})	Température du plasma (K)
Faible	1	$11\,500 \pm 2\,400$
Moyenne	4,3	$12\,000 \pm 1\,700$
Forte	7,7	$11\,200 \pm 1\,600$

Tableau 1. Température et densité électroniques en fonction de l'intensité d'émission des raies du cuivre

Pour un courant plus faible ($I_{\max}=150 \text{ A}$, pour $U_0 = 140 \text{ V}$) la température est plus faible : $T_e=5500 \text{ K}$. Les températures obtenues avec le dispositif 2 sont indiquées sur la Figure 2,

pour deux valeurs maximales du courant (280 et 460 A). La durée de l'impulsion est d'environ 0,25 ms.

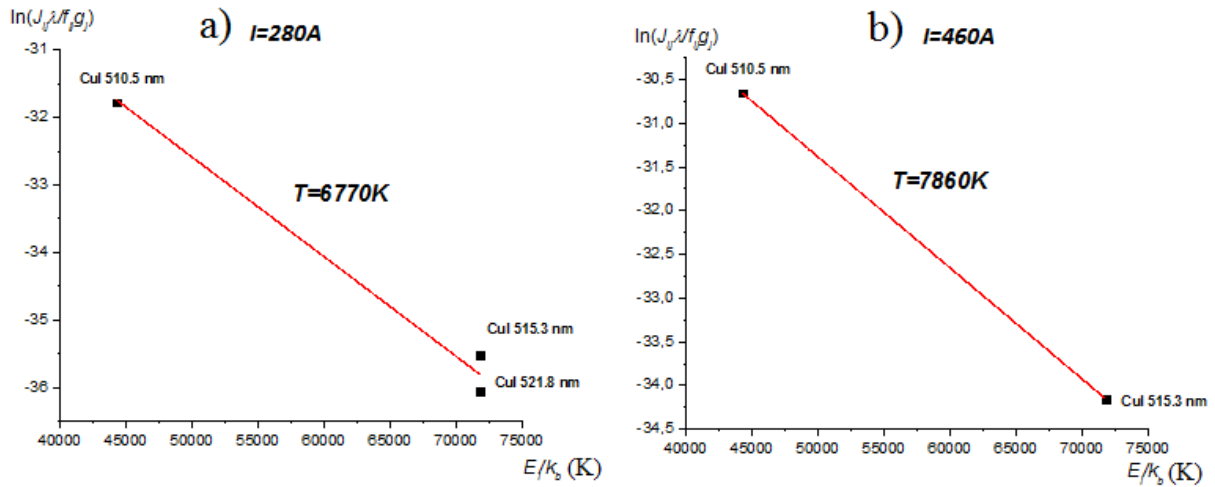


Figure 2. Diagramme de Boltzmann utilisé pour déterminer T_e avec le dispositif 2 (en ordonnée : terme proportionnel au logarithme de l'émissivité, en abscisse : terme proportionnel à l'énergie du niveau supérieur).

On constate que la température du plasma est d'autant plus élevée que le courant est important. Notons également que la raie du cuivre I à 510 nm peut être auto-absorbée pour des courants supérieurs à 400 A, ce qui peut s'expliquer par une concentration élevée en vapeurs de cuivre et la présence importante de cuivre dans les zones périphériques de l'arc où la température est moins élevée. Les cas où l'auto-inversion de la raie est observée n'ont pas été pris en compte car cela peut conduire à une surestimation de la température. Il faut également noter que pour un courant de 460 A, la raie Cu I à 521,8 nm est exclue du calcul de température à cause du chevauchement avec la raie voisine Cu I à 522,0 nm. La densité électronique, dans le cas d'un courant maximal de 440 A (pour lequel $T_e = 7500$ K) est de $3,11 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, valeur compatible avec les résultats obtenus avec le dispositif 1.

Les étapes successives de l'évolution de la décharge, observées par imagerie rapide, sont présentées sur la Figure 3. On constate la formation d'une bulle de vapeur (gris clair) entourant l'arc (zone la plus brillante) qui croît jusqu'à conduire à la déformation de la surface du liquide : les rides entourant la zone centrale sur les images semblent indiquer que la bulle débouche à la surface au maximum de son expansion. Sa taille maximale est de l'ordre de 5 mm. L'arc lui-même occupe la zone centrale de la bulle. La plus forte luminosité des images obtenues avec le filtre interférentiel centré à 510 nm, comparée à celles obtenus avec le filtre à 780 nm, confirme le fait que le plasma est principalement composé de vapeurs issues de l'érosion des électrodes en cuivre.

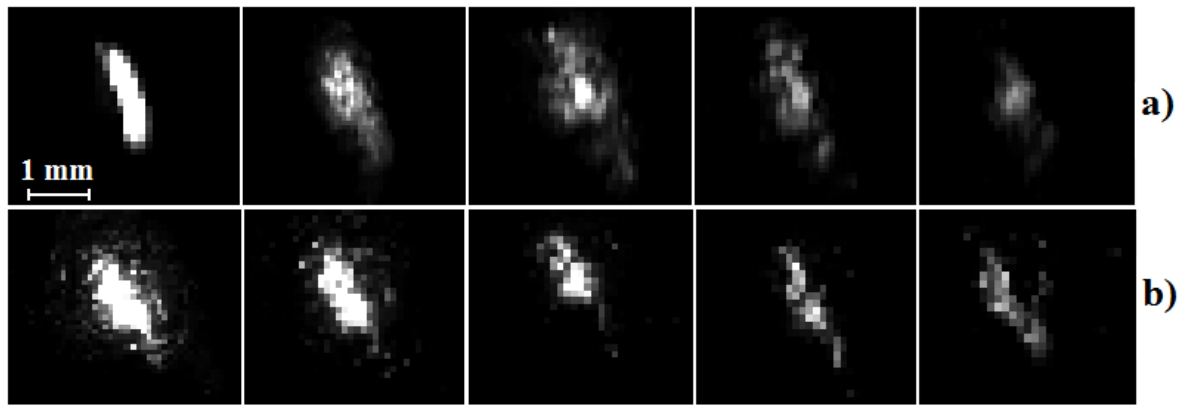


Figure 3. Photographies de la décharge obtenues par imagerie rapide (100 000 images/s), $U \sim 100$ V, $I = 560$ A, surface des électrodes sous 5 mm d'eau.
(a) filtre à 780 nm, (b) filtre à 510 nm.

Conclusion et perspectives

Les essais réalisés avec les deux dispositifs conduisent à des valeurs de la température et de la densité électronique cohérentes. Les résultats présentés sur le tableau 1 montrent une forte corrélation entre la densité électronique et l'intensité du rayonnement émis par le cuivre. Les valeurs obtenues pour la densité électronique sont compatibles pour une pression entre 5 et 7 bars à l'intérieur de la bulle. Les travaux ultérieurs vont permettre d'améliorer la précision de la détermination de la zone visée dans l'arc pour l'acquisition des spectres, permettant d'obtenir des résultats résolus spatialement et temporellement.

Remerciements

Les auteurs remercient Campus France d'avoir contribué aux recherches réalisées au LAPLACE à travers son financement destiné au séjour de l'auteure correspondante en France.

Références

- [1] J. Polte (2015), Fundamental growth principles of colloidal metal nanoparticles – a new perspective. *CrystEngComm*, 36 : 6809-6830. doi : 10.1039/C5CE01014D.
- [2] K.G. Lopatko, M.D. Melnychuk, Y.G. Aftandilants (2013), Application of Colloidal Forms of Trace Elements in the Disturb Mineral Nutrition of Plants. *Earth Bioresources and Quality of Life*, 4 : 85-92.
- [3] T.A. Tmenova, A.N. Veklich, V.F. Boretskij et.al. (2017), Optical emission spectroscopy of plasma of underwater electric spark discharges between metal granules. *Problems of Atomic Science and Technology, Series: Plasma Physics*, 1 : 132-135. ISSN 1562-6016.
- [4] K. Fu, M. Jogwich, M. Knebel et.al. (1995), 'Atomic transition probabilities and lifetimes for the Cu I system', *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 61, 1-30.
- [5] H.R. Griem (1969), *Plasma Spectroscopy*. Moscow: "Atomizdat", p.452