

# Proposition d'une méthode visant à estimer l'énergie apportée par un arc à une anode en Ag-SnO<sub>2</sub>

A. Fouque<sup>1,3</sup>, A. Bonhomme<sup>2</sup>, G. Cailletaud<sup>3</sup>, F. Chaudot<sup>2</sup>, V. Esin<sup>3</sup>, F. Houzé<sup>1</sup>, R. Landfried<sup>1</sup>, M. Lisnyak<sup>2</sup>, J.-L. Ponthenier<sup>2</sup>, Ph. Testé<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire GeePs, UMR CNRS-CentraleSupélec 8507, UPMC et Université Paris-Sud, 11 rue Joliot-Curie, 91192 Gif sur Yvette Cedex, France*

<sup>2</sup> *Strategy & Innovation, Schneider Electric, 31 rue F. Quesnay - F-38320 Eybens, France*

<sup>3</sup> *MINES ParisTech, PSL Research University, Centre des Matériaux, CNRS UMR 7633 BP 87, 91003 Evry Cedex, France*

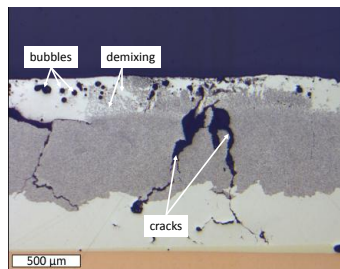
Contact : philippe.teste@centralesupelec.fr

## Résumé :

Une méthode est proposée en vue d'estimer les caractéristiques du flux de puissance apporté à une anode en Ag-SnO<sub>2</sub>. Elle est basée d'une part sur l'observation optique et par électrons rétrodiffusés (EBSD) de la zone fondue par l'arc, permettant ainsi d'évaluer la profondeur et le rayon fondus, et d'autre part sur une modélisation thermique permettant d'estimer une tension équivalente (coefficient de proportionnalité entre l'intensité du courant d'arc et la puissance reçue) et la densité surfacique de puissance.

### 1) Introduction :

Le dimensionnement des contacteurs nécessite la compréhension de nombreux phénomènes physiques couplés (électriques, métallurgiques, thermiques, mécaniques...). Les pastilles de contact subissent, tout au long de la durée de vie du composant, de très nombreux arcs électriques (plusieurs centaines de milliers idéalement) lors des opérations d'ouverture et de fermeture du contacteur et sont ainsi endommagées progressivement. Ces manœuvres répétées peuvent conduire à la défaillance du composant pour diverses raisons : soudure des pastilles des contacts, augmentation rédhibitoire de la résistance de contact, destruction partielle ou totale des pastilles (érosion, fissures...). Ceci est illustré sur la figure 1 qui présente une coupe d'une pastille de contact en Ag-SnO<sub>2</sub> après 50 000 ouvertures avec une intensité de courant d'arc d'environ 300 A rms. On peut observer l'apparition de bulles et de fissures dans le matériau qui résultent de cycles de fusion-resolidification du pseudo-métal, ainsi que des zones de démixtion entre l'argent et l'oxyde d'étain.



**Figure 1 :** Coupe d'une pastille de contact en Ag-SnO<sub>2</sub> montrant la dégradation (bulles, fissures, zone de séparation de Ag et de SnO<sub>2</sub>) de la pastille après 50 000 arcs ( $I = 300$  A rms).

De nombreuses études expérimentales [1-8] ont été menées au sujet de la dégradation des pastilles de contact en Ag-SnO<sub>2</sub>. Elles concernent les phénomènes d'érosion des électrodes (soit par pesée des contacts au bout d'un grand nombre d'arcs, soit par l'observation au profilomètre optique par exemple des différents cratères et de l'évolution de la surface au cours des essais), la soudure des pastilles de contact... Certains travaux de modélisation ont aussi été proposés. Une étape indispensable en vue de modéliser l'évolution métallurgique et l'usure de la pastille de contact est l'estimation d'un bon ordre de grandeur de l'énergie reçue par les pastilles de contacts au cours de la vie du contacteur et donc au cours d'un arc. Dans un précédent travail [9-10], nous avons présenté une première méthode pour

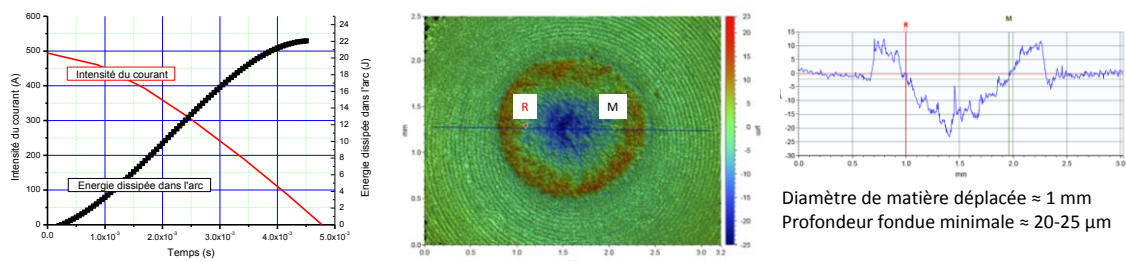
estimer les caractéristiques du bilan de puissance aux électrodes. Dans ce travail nous proposons une autre méthode basée d'une part sur l'observation après un arc d'ouverture de la surface de l'électrode à l'aide d'un profilomètre 3D optique et d'autre part sur l'observation en coupe du bain de fusion. Il s'agit là encore d'une approche indirecte s'appuyant sur des résultats expérimentaux permettant à l'aide d'une modélisation simple d'obtenir des caractéristiques du flux de puissance apporté aux électrodes. L'article est organisé de la façon suivante :

- Une première partie concerne les résultats expérimentaux et plus particulièrement les observations réalisées sur une anode ayant subi un arc d'ouverture. Les observations sont de plusieurs types : une observation de la surface à l'aide d'un profilomètre optique qui permet d'obtenir un relevé précis de la rugosité de surface et des observations d'une coupe de la pastille de contact soit de façon optique soit par des électrons rétrodiffusés.
- Une seconde partie concerne l'exploitation des résultats expérimentaux à l'aide d'un modèle thermique simple en vue de caractériser le bilan de puissance aux électrodes.

## 2) Description de la démarche expérimentale :

Une façon classique d'étudier l'érosion des électrodes par l'arc repose sur la mesure des pertes de masse. Cette démarche présente l'avantage des méthodes statistiques puisqu'elle consiste à moyenniser sur plusieurs dizaines, centaines voire milliers d'arcs les pertes de masse des électrodes liées aux éjections de gouttelettes ou à la vaporisation du matériau. En revanche, elle ne permet pas de voir en détail au niveau de la surface les endommagements créés par chaque arc. Une autre méthode, utilisée ici, repose sur l'observation de la surface par profilométrie optique. Ceci est particulièrement utile dans le cas d'un arc unique, mais présente donc l'inconvénient de ne pas fournir une représentation moyenne du comportement d'un arc. En revanche, l'observation des traces (cratères) laissées par un arc sur la surface d'une électrode présente de nombreux avantages. Nous avons ainsi accès à la valeur des profondeurs et des rayons des cratères formés sous l'action de l'arc. Nous pouvons aussi quantifier les volumes de matière déplacés ce qui est un apport important par rapport à la méthode classique de pesée des électrodes qui ne fait pas apparaître la quantité de matière déplacée, mais uniquement la quantité perdue. De même, nous pouvons aisément observer les rugosités et déformations de la surface engendrées par l'arc et ainsi faire des hypothèses sur la mobilité à petite échelle du pied de l'arc, ce qui n'est pas toujours facile à observer à l'aide d'une caméra rapide. En complément, des observations d'une coupe de la pastille de contact ont été faites soit de façon optique soit par des électrons rétrodiffusés. Elles ont mis en évidence des changements dans la structure métallurgique du matériau permettant de mieux délimiter la zone de matériau fondu.

Dans cette étude nous nous sommes intéressés au cas d'une anode plane en Ag-SnO<sub>2</sub> ayant subi une ouverture (interruption de courant). Les évolutions de l'intensité du courant d'arc (en rouge) et de l'énergie dissipée au cours de celui-ci (en noir) sont représentées sur la figure 2 (à gauche). La tension d'arc n'est pas représentée, sa valeur moyenne se situe autour de 20 V.



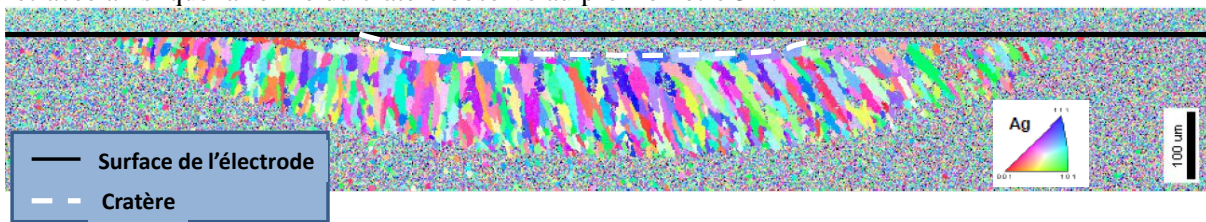
**Figure 2** (à gauche) : Évolution du courant d'arc et de l'énergie dissipée dans l'arc.

**Figure 3** (au centre) : Vue du dessus de la surface obtenue en profilométrie optique.

**Figure 4** (à droite) : Profil 2D mettant en évidence le matériau fondu déplacé.

Sur les figures 3 (au centre) et 4 (à droite) une vue de dessus obtenue par profilométrie 3D du cratère créé par l'arc ainsi qu'un profil mesuré le long d'un diamètre du cratère sont présentés. On peut, à partir de ces images, déduire que le diamètre fondu est au moins égal à la distance entre les points R et M (figures 3 et 4), c'est-à-dire environ 1 mm, et que la profondeur fondue est au moins égale à 25 µm.

La figure 5 montre une observation complémentaire réalisée sur une coupe de la pastille à l'aide d'électrons rétrodiffusés (EBSD) après attaque chimique spécifique. La coupe réalisée passe autant que faire se peut par le centre du cratère (tout en gardant à l'esprit que le positionnement de la coupe n'est pas aisé). On peut distinguer des zones de recristallisation du matériau après fusion et on peut ainsi en déduire approximativement l'étendue de la zone fondue. Dans le cas présent, la profondeur est de l'ordre de 185  $\mu\text{m}$  et le diamètre fondu de 1415  $\mu\text{m}$  ; l'observation optique conduit par ailleurs à une profondeur proche (175  $\mu\text{m}$ ) mais un diamètre supérieur (1525  $\mu\text{m}$ ). On peut noter que la profondeur de la zone fondue ainsi déterminée est nettement supérieure à la profondeur du cratère observé au profilomètre. Il en est de même pour le diamètre de la zone fondue. Ceci est peut être lié au fait que le matériau Ag-SnO<sub>2</sub> est particulièrement « visqueux » à l'état liquide (au-delà de la température de fusion de Ag) ce qui contribue à diminuer les mouvements du bain fondu sous l'action des forces de Laplace et de Marangoni. Sur la figure 5 la surface de l'électrode plane initiale a été retracée ainsi que la forme du cratère observé au profilomètre 3D.



**Figure 5 :** Observation par EBSD d'une coupe de l'anode selon un diamètre du cratère.

### 3) Modélisation simple de l'échauffement de l'anode et obtention d'informations concernant le bilan de puissance à l'anode :

#### Description de la méthode :

Pour décrire le chauffage de l'anode par l'arc électrique, une approche macroscopique de l'interaction arc-électrodes a été choisie. Elle se fait à l'échelle d'un pied d'arc de dimensions macroscopiques. Dans ces conditions, la puissance et la densité de puissance vont être écrites sous la forme suivante :

$$P = I_{arc} \times V_{eq}$$

$$Q(r) = J(r) \times V_{eq}$$

où  $P$  est la puissance apportée à l'anode,  $V_{eq}$  est une tension équivalente qui traduit les échanges d'énergie à une échelle macroscopique,  $I_{arc}$  est le courant d'arc et  $Q(r)$  et  $J(r)$  sont respectivement la densité surfacique de puissance et la densité de courant apparente à l'échelle du pied d'arc. Le modèle, déjà décrit dans [11], a les caractéristiques suivantes : le pied d'arc sur les électrodes est considéré immobile, le problème aura donc une géométrie axisymétrique ; l'effet Joule est négligé ; la tension équivalente ainsi que la densité surfacique de puissance seront indépendantes du temps. Dans cette étude, cette dernière (et donc la densité de courant dans le pied d'arc) sera considérée comme constante dans le pied d'arc. Ainsi on aura très simplement les expressions suivantes liant rayon du pied anodique  $a(t)$ , densité de courant et intensité du courant d'arc :

$$J(r) = J_0 \text{ pour } r \in [0; a(t)] \text{ et } a(t) = \sqrt{\frac{I_{arc}(t)}{\pi \times J_0}}$$

Concernant les conditions aux limites, l'électrode cylindrique est chauffée sur sa partie supérieure par le flux de puissance. Sur les bords latéraux le refroidissement par convection et rayonnement sera négligé (ceci est justifié par la faible durée de l'arc considéré  $\approx 5$  ms). La hauteur de l'électrode est suffisamment importante pour considérer que le fond de l'électrode demeure à température constante durant l'arc. La résolution de l'équation de la chaleur permet alors d'obtenir l'évolution de la distribution de température dans l'électrode durant l'arc. Les changements de phase (fusion et vaporisation) sont pris en compte. Les valeurs des caractéristiques du matériau Ag-SnO<sub>2</sub> sont extraites de [12,13].

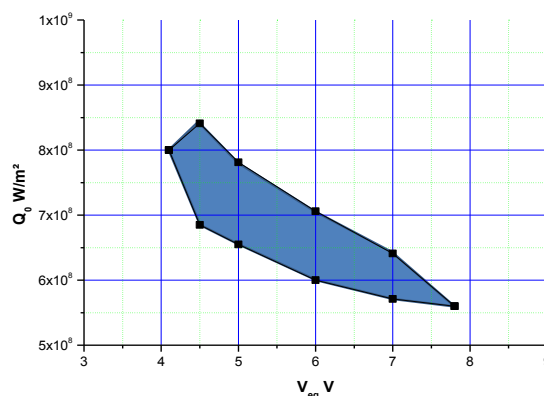
#### Résultats :

L'objectif est donc de déterminer les valeurs de  $V_{eq}$  et de  $Q_0$  qui, par le calcul, vont permettre de s'approcher « au mieux » des rayons et profondeurs fondus observés. Les observations optiques et en électrons rétrodiffusés conduisant à des valeurs légèrement différentes pour les diamètres fondus (1525 et 1415  $\mu\text{m}$ ), nous nous sommes fixés deux critères pour retenir les couples de valeurs ( $V_{eq}$ ,  $Q_0$ ) que nous considérons comme compatibles. L'un (noté C1) porte sur le rayon fondu, l'autre (noté C2) sur la profondeur. Ainsi nous avons cherché à minimiser simultanément ces deux critères à savoir :

$$C1 = \left| \frac{\text{rayon fondu mesuré} - \text{rayon fondu calculé}}{\text{rayon fondu mesuré}} \right| \leq 0.15$$

$$\text{et } C2 = \left| \frac{\text{profondeur fondue mesurée} - \text{profondeur fondue calculée}}{\text{profondeur fondue mesurée}} \right| \leq 0.15$$

Suivant ces critères nous obtenons, dans les axes  $V_{eq}$ ,  $Q_0$ , une zone de valeurs conduisant à des profondeurs et rayons fondus compatibles avec le modèle et l'expérience (cf. figure 6). Schématiquement  $V_{eq}$  est dans la gamme 4.1 – 7.8 V et  $Q$  dans la gamme  $5.6 \cdot 10^8$  –  $8.5 \cdot 10^8$  W/m<sup>2</sup>.



**Figure 6 :** Zone dans les axes ( $V_{eq}$ ,  $Q_0$ ) de compatibilité entre modèle et expérience.

#### 4) Conclusion :

Une méthode a été proposée permettant d'estimer les caractéristiques du flux de puissance apporté à une anode en Ag-SnO<sub>2</sub>. Ceci a été également réalisé pour une cathode. L'observation de sections des électrodes a permis d'estimer la zone fondue de façon plus précise qu'en profilométrie 3D. Les dimensions ainsi obtenues servent de critères de convergence dans la résolution du problème inverse consistant à estimer un flux de puissance rendant compatibles modèle et expérience. Les valeurs obtenues pour  $V_{eq}$  ( $P = I_{arc} \times V_{eq}$ ) sont dans la gamme 4.1 – 7.8 V et pour la densité surfacique de puissance  $Q$  dans la gamme  $5.6 \cdot 10^8$  –  $8.5 \cdot 10^8$  W/m<sup>2</sup>.

#### Références :

- [1] M. Zhang, X. Wang, X. Jang, J. Zou, S. Liang, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 26, pp.783–790 (2016).
- [2] J. Swingler, J. McBride, IEEE Trans. on CPMT-Part A, 19 (3), pp.404-415 (1996).
- [3] M. Hasegawa, K. Takahashi, Proc. of the 59th IEEE Holm Conf., pp.288-294 (2013).
- [4] C. Leung, E. Streicher, D. Fitzgerald, Proc. of the 50th IEEE Holm Conf., pp.64-69 (2004).
- [5] H. Jiang, L. Zhenbiao, 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST) (2015).
- [6] J. Swingler, J. McBride, IEEE Trans. on CPMT-Part A, 21 (1), pp.54-60 (1998).
- [7] M. Sun, Q. Wang, M. Lindmayer, IEEE Trans. on CPMT-Part A, 17 (3), pp 490-494 (1994).
- [8] A.M. Gouega, Ph. Testé, R. Andlauer, T. Leblanc, J.-P. Chabrierie, Eur. Phys. J. AP 11, pp.111-122 (2000).
- [9] R. Landfried, F. Houzé, T. Leblanc, Ph. Testé, Proc. of the 63rd IEEE Holm Conf., pp.205-208 (2017).
- [10] Ph. Testé, R. Landfried, F. Houzé, A ; Fouque, G. Cailletaud, V. Esin, A. Bonhomme, F. Chaudot, J.-L. Ponthenier, XIII<sup>ème</sup> Colloque sur les Arcs Electriques - 3<sup>ème</sup> workshop sur les Arcs et Contacts Electriques (2017).
- [11] J. Devautour, thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, Paris (1992).
- [12] A. Bonhomme, thèse de doctorat de l'école nationale supérieure des Mines de Nancy (2005).
- [13] A. Fuentes, thèse de doctorat, Université Bretagne Sud (2010).