

CARACTERISATIONS THERMIQUE, ELECTRIQUE ET INTERFACIALE EN VUE D'UNE ETUDE NUMERIQUE D'UN PROCEDE D'ASSEMBLAGE DE MATERIAUX DE CONTACT

A. Fuentes ⁽¹⁾⁽²⁾, P. Carre ⁽¹⁾, P. Rogeon ⁽¹⁾, T. Loulou ⁽¹⁾, G. Sierra ⁽²⁾

- (1) : Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne (LIMAT^B) Université Européenne de Bretagne - Centre Universitaire de Recherche, rue Saint Maudé, 56325 Lorient Cedex, France
(2) : Schneider Electric – Technopole – 37 Quai Paul Louis Merlin 38050 Grenoble, France
adrien.fuentes@univ-ubs.fr / adrien.fuentes@fr.schneider-electric.com, patrick.carre@univ-ubs.fr,
philippe.rogeon@univ-ubs.fr, tahar.loulou@univ-ubs.fr, guillaume.sierra@fr.schneider-electric.com

RESUME

Ce travail se situe en amont de l'étude de l'assemblage par soudage résistif d'un matériau de contact sur son support en cuivre. On y présente d'une part la caractérisation des propriétés thermique et électrique d'un matériau composite (AgSnO₂) doté d'une matrice conductrice (Ag) et de renforts (SnO₂) et d'autre part la détermination des résistances de contact électrique et thermique du couple de matériaux concerné lors du processus d'assemblage. La singularité de ce travail réside dans la mise au point d'une métrologie adaptée aux propriétés extrêmes de la matrice (forte conductivité électrique et thermique) et à la méthode d'élaboration de ce matériau (pastillage et frittage).

NOMENCLATURE

MDC : Matériau de contact	d.d.p : Différence de potentiel (V)
RCE : Résistance de contact électrique ($\Omega \cdot \text{mm}^2$)	$\rho(T)$: Masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
RCT : Résistance de contact thermique ($\text{K} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{mm}^2$)	$\sigma(T)$: Conductivité électrique ($\text{MS} \cdot \text{m}^{-1}$)
c_p : Capacité thermique massique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	$\alpha(T), a(T)$: Diffusivité thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
T_0 : Température ambiante ($^{\circ}\text{C}$)	$\lambda(T)$: Conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

1. INTRODUCTION

L'exploitation d'une installation électrique, en toute sécurité, nécessite la maîtrise de la fermeture mais aussi de l'ouverture d'un circuit électrique lors des conditions nominales ou lors de conditions exceptionnelles (court-circuit, blocage moteur, surintensité...). Lors de la fermeture des contacts, des phénomènes de rebond peuvent apparaître, créant un arc électrique entre ceux-ci, et engendrant une fusion superficielle des matériaux de contacts (MDC). Le matériau étudié ici a pour rôle d'assurer l'ouverture et la fermeture d'un circuit électrique au sein d'un dispositif et ceci pendant un grand nombre de manœuvre. La présence d'oxyde SnO₂ (12% m) au sein de la matrice d'Ag (88% m) permet notamment de limiter le soudage des contacts entre eux et d'améliorer leur tenue mécanique. Pour élaborer ce matériau composite AgSnO₂, il est impératif de répartir avec homogénéité le renfort au sein de la matrice. Pour y parvenir, le MDC est issu de la métallurgie des poudres. Une étude par voie numérique et expérimentale est actuellement engagée sur la soudabilité opératoire et métallurgique de ce MDC sur son support cuivre par soudage résistif.

Le travail de caractérisation présenté ici a pour objectif l'établissement d'une base de données nécessaire au modèle mis au point pour la simulation numérique de la phase d'assemblage par soudage résistif de ce MDC sur son support Cu. Ces données concernent en premier lieu les propriétés thermiques et électriques du MDC. Les conductivités thermique et électrique, la capacité thermique massique ainsi que la masse volumique sont mesurées en fonction de la température. L'importance des conditions interfaciales lors du soudage résistif, mise en avant dans de nombreux travaux [1-3], nécessite aussi de caractériser les résistances de contact électrique RCE et thermique RCT au niveau des interfaces entre les différents couples métalliques constituant l'assemblage. Un

dispositif spécifique est utilisé pour mesurer les évolutions des grandeurs RCT et RCE en fonction de la pression et de la température.

Signalons en outre qu'aucune donnée expérimentale n'est actuellement disponible dans la littérature sur ce matériau de contact très spécifique. Par ailleurs, toutes les caractérisations menées et présentées dans cette étude sont effectuées avec un matériau pastillé puis densifié à 95% par frittage. Dans les conditions expérimentales employées (température, pression) la densité du MDC n'évolue pas.

2. DESCRIPTION DES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

2.1 Mesure de diffusivité

La mesure de diffusivité thermique est réalisée par méthode flash laser. Les échantillons ont une épaisseur de 2,6 mm pour une section de 120 mm² (12x10). Le diamètre du faisceau est mesuré à environ 20 mm et l'échantillon est situé dans la zone uniforme de l'éclairement incident. Le couple thermoélectrique employé est de type K, en montage intrinsèque, les conducteurs ayant un diamètre de 125 µm. L'expérimentation a été menée dans un four sous vide secondaire (10⁻⁴ mbar). La durée d'impulsion du flash laser est mesurée à 250 µs. Les différents modèles (adiabatique, avec pertes, prise en compte de la durée d'impulsion) qui ont été comparés n'introduisent pas de différences significatives sur les valeurs calculées. Le modèle adiabatique est retenu pour identifier la valeur de diffusivité sur l'ensemble du thermogramme (Figure 1).

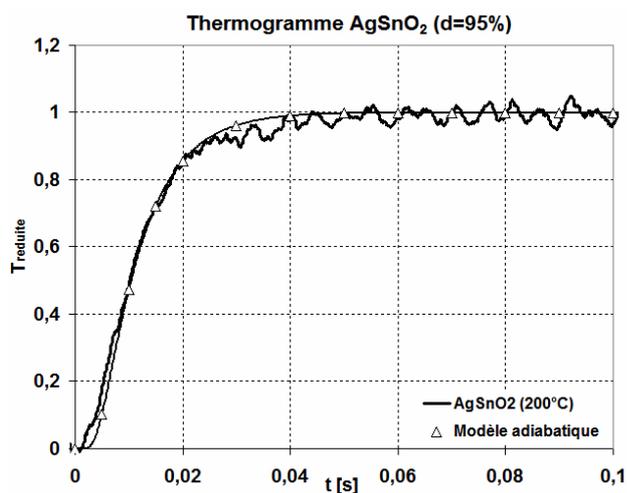


Figure 1: Thermogramme de l'AgSnO₂ à 200°C

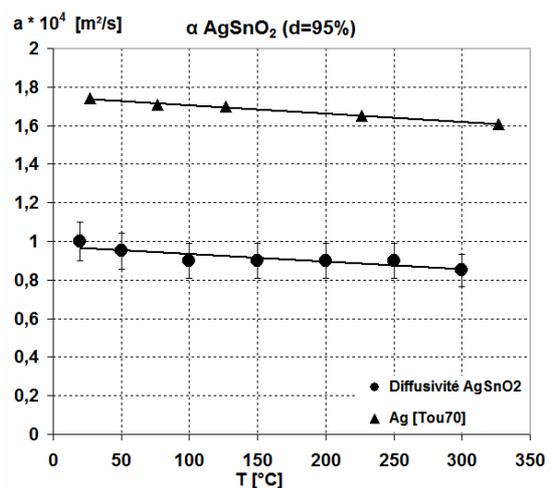


Figure 2: Diffusivité de l'AgSnO₂

Les valeurs obtenues sont comparées à celles issues de la littérature pour l'Ag massif [4] (Figure 2). Le comportement décroissant en fonction de la température est en accord avec celui de l'Ag. L'écart présent entre l'Ag et le MDC AgSnO₂ est constant, et s'explique par la présence d'un oxyde de plus faible diffusivité thermique au sein de la matrice ainsi que par la présence de porosités (5%). La très forte diffusivité mesurée conduit à une incertitude assez importante de l'ordre de 10% sur les résultats obtenus.

2.2 Mesure de dilatation linéaire

Les mesures dilatométriques ont été menées avec un dilatomètre quasi-absolu LINSEIS L75/20 selon un diamètre des pastilles du MDC puis selon leur épaisseur. La connaissance du coefficient de dilatation linéique d'un matériau permet ensuite d'exprimer la dilatation volumique en fonction de la température. Les résultats obtenus montrent un comportement légèrement anisotrope jusqu'à 500°C, sans doute lié au mode d'élaboration des MDC (pastillés-frittés-calibrés) (Figure 3). Si l'on retient l'hypothèse d'une dilatation anisotrope transverse, il est possible de proposer une évolution de $\rho(T)$ (Figure 4). La prise en compte ou non de l'anisotropie transverse n'introduit aucune différence significative sur l'évolution de $\rho(T)$.

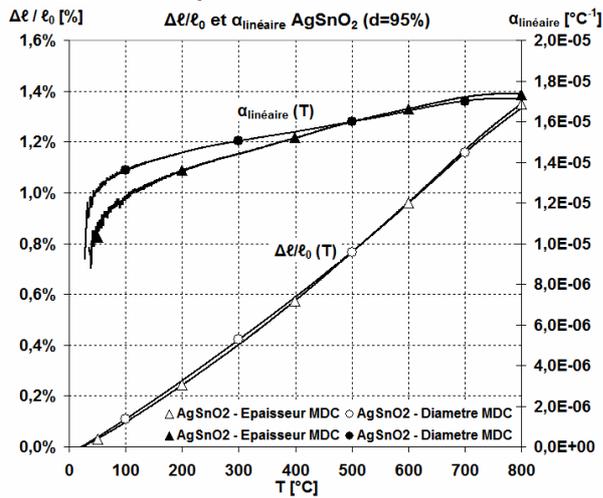


Figure 3: Evolution de la dilatation linéique et du coefficient de dilatation linéaire de l'AgSnO₂

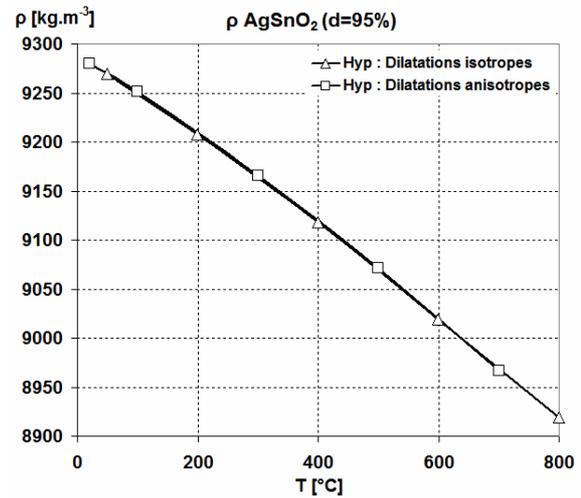


Figure 4: Evolution de la masse volumique de l'AgSnO₂

2.3 Mesure de capacité thermique massique

Les mesures de chaleur massique (c_p) ont été réalisées sur un microcalorimètre Calvet (Setaram HT1000). Les essais ont été effectués entre 50°C et 600°C avec des échantillons de masse totale $m \approx 17$ g, encapsulés sous Ar dans une cellule en verre. Chaque mesure est issue de la réponse à une variation de température de 10°C autour d'une valeur moyenne. La vitesse de montée est de 1,5°C/h. Ces mesures de c_p sont comparées à des estimations effectuées par loi de mélange entre l'Ag et le SnO₂ [5] (Figure 5). Une différence d'environ 10% apparaît, elle peut s'expliquer par la valeur prise pour la capacité thermique de l'oxyde SnO₂ lors du calcul de la loi de mélange. Néanmoins, les mesures sont proches des estimations proposées. Les mesures calorimétriques sont considérées précises à 3%. Un réétalonnage du calorimètre est en cours.

2.4 Estimation de la conductivité thermique

Les précédentes mesures permettent de calculer l'évolution de la conductivité thermique du MDC AgSnO₂. La conductivité thermique est définie par : $\lambda(T) = a(T) \cdot \rho(T) \cdot c_p(T)$. Etant donné que les différentes caractérisations effectuées n'ont pas été menées jusqu'à la même valeur de température maximum, une extrapolation est nécessaire pour pouvoir exprimer $\lambda(T)$ sur l'intervalle désiré. Dans la figure ci-dessous (Figure 6), toutes les propriétés sont connues jusqu'à 300°C. Ensuite, dans le deuxième tronçon [300°C - 600°C], seule la diffusivité est inconnue. Aucune transformation métallurgique ne se produisant dans ce domaine de température, l'évolution de la diffusivité est extrapolée linéairement jusqu'à 600°C.

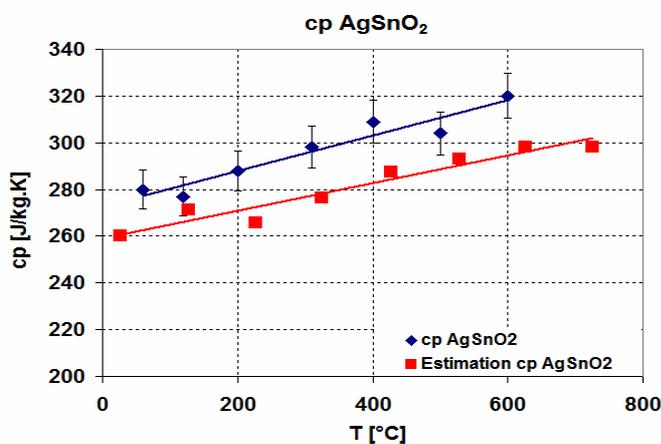


Figure 5: Capacité thermique massique de l'AgSnO₂

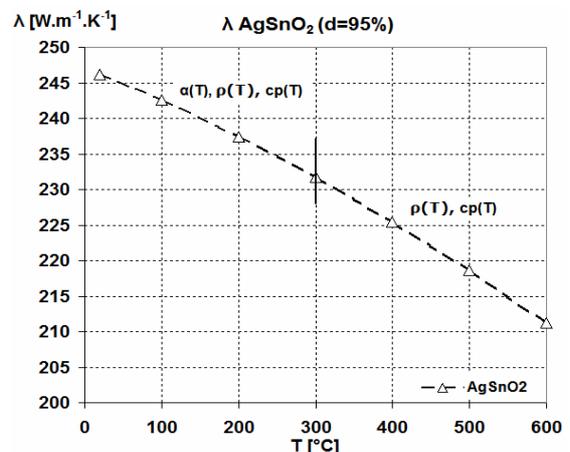


Figure 6: Evaluation de la conductivité thermique de l'AgSnO₂

2.5 Mesure de conductivité électrique

Le MDC étant assemblé par soudage résistif sur son support, il est indispensable de bien connaître cette propriété en fonction de la température ; c'est le moteur de l'échauffement lors du processus d'assemblage.

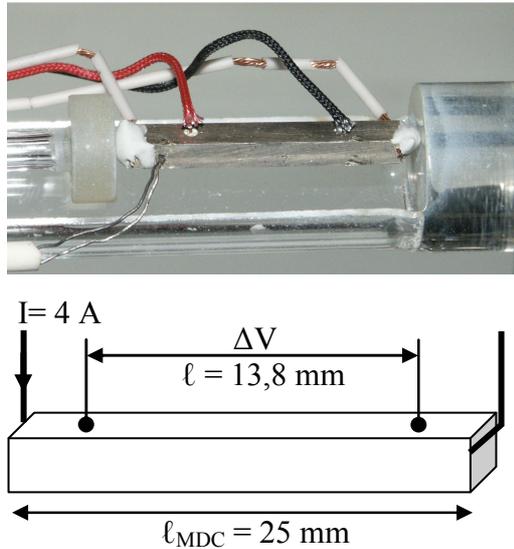


Figure 7: Cliché de l'instrumentation et schéma représentatif du montage

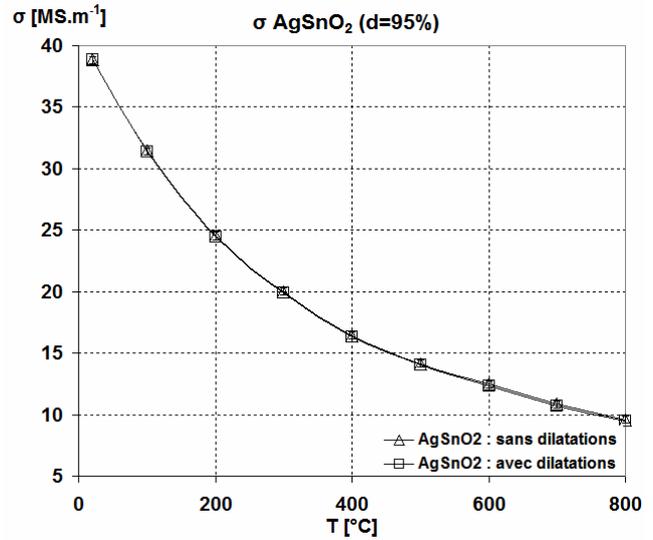


Figure 8: Evolution de la conductivité électrique de l'AgSnO₂

L'expérimentation consiste à faire circuler un courant continu au travers d'un parallélépipède de MDC et de mesurer la d.d.p induite par la résistance de l'échantillon. La difficulté de cette manipulation réside dans la forte conductivité de la matrice d'Ag ($\sigma_{Ag}(T_{amb}) = 63 \text{ MS.m}^{-1}$) qui implique de très faibles d.d.p mesurées. Pour y parvenir, l'échantillon est instrumenté avec deux sondes de tension, serties à même le MDC pour limiter la résistance de contact, et assez éloignées de l'amenée de courant afin de mesurer des d.d.p dans des équipotentielles établies. La distance entre l'arrivée (ou le départ) du courant et les sondes de tension a été déterminée par une simulation effectuée sous COMSOL en se plaçant dans le cas le plus défavorable (T_{amb}). L'épanouissement complet du courant au travers de l'échantillon est observé numériquement à environ 5mm de l'arrivée de courant. En complément, une mesure par courant de Foucault à température ambiante a permis de valider l'expérimentation, car c'est à T_{amb} que le MDC a la conductivité électrique la plus importante et donc la plus difficile à mesurer. *In-fine*, une correction en termes de dilatation (Δl et $\Delta S_{surface}$) entre sondes de tension a été prise en compte dans le calcul, il s'avère que cette correction de mesure est du second ordre et peut être négligée. Un calcul d'incertitude à T_{amb} nous permet d'avancer une imprécision sur la valeur de mesure de $\pm 1\%$

2.6 Mesure de résistance de contact

Un banc de mesure expérimental a été développé au LIMAT^B [3] pour mesurer *ex-situ* les évolutions des résistances de contact électrique ou thermique en fonction de la température et de la pression. Le principe consiste à empiler des couples métalliques entre deux poinçons thermostatés équipés de thermocouples et pris dans les mors d'une presse électrique de marque MTS. La technique d'empilement permet de multiplier le nombre d'échantillons et par conséquent le nombre d'interfaces. Le mode de chauffage de l'empilement réalisé par conduction permet de maîtriser et d'accéder à la connaissance de la température des interfaces contrairement à un chauffage par effet Joule, ce qui est fondamental. Les poinçons sont régulés en température afin de créer la sollicitation thermique désirée dans l'empilement étudié. Les mesures peuvent être effectuées jusqu'à une pression de 80 MPa, de la température ambiante à 550 °C environ.

Dans le cas de la mesure de RCE un courant électrique de faible niveau (1,5 A) circule dans l'empilement pour éviter tout phénomène d'échauffement par effet Joule au niveau des interfaces. Une isolation latérale limite les échanges thermiques avec l'environnement dans le cas de la mesure de RCT. Les valeurs des résistances de contact RCE ou RCT sont obtenues à partir de la mesure des résistances électriques ou thermiques des empilements, en soustrayant les valeurs des résistances des échantillons. Pour garantir une précision acceptable sur ces mesures de RCE et RCT, il est capital de disposer de valeurs fiables pour les conductivités électriques et thermiques des matériaux, d'où l'importance de la qualité des caractérisations présentées précédemment.

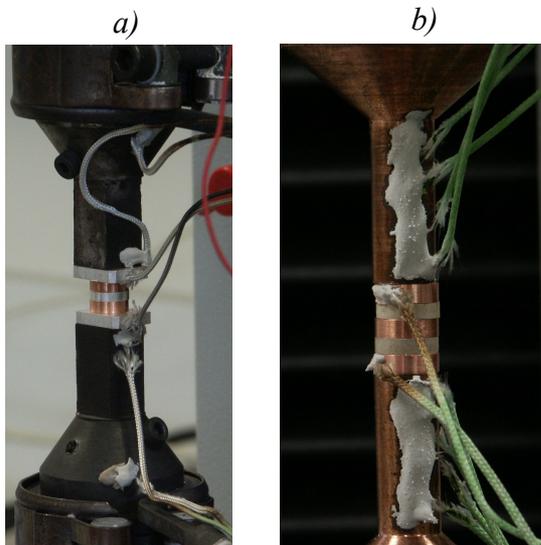


Figure 9 : Empilement d'étude RCE (a) et RCT (b)

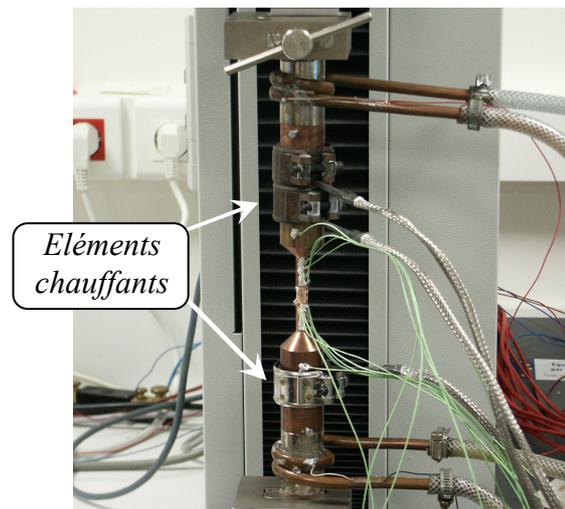


Figure 10 : Banc de mesure

Les résultats présentés ci-dessous concernent le contact $\text{AgSnO}_2 / \text{Cu}_{(\text{OFHC})}$. Les états de surface des matériaux à assembler ont été caractérisés par rugosimétrie à lumière blanche. Les échantillons utilisés pour les mesures des RC présentent les mêmes propriétés de surface. Le protocole de préparation des échantillons est identique pour les RCE et RCT, les échantillons subissent un décapage (HCl 3%) et un dégraissage (éthanol) avant d'être intégrés au sein de l'empilement, ce qui permet d'améliorer notablement la reproductibilité des caractérisations.

2.6.1 Résistance de contact électrique (RCE)

L'évolution de la RCE $\text{AgSnO}_2 / \text{Cu}_{(\text{OFHC})}$ est monotone décroissante en fonction de la température et analogue à celle observée pour la RCT (2.6.2). Jusqu'à la température de 150°C, la RCE reste supérieure aux résistances des matériaux constitutifs de l'assemblage, au-delà sa valeur s'effondre et les résistances des matériaux dominant. En conséquence, au début de la séquence d'assemblage, c'est la RCE qui sera le moteur de l'échauffement, ensuite les matériaux à assembler prendront le relais dissipatif (Figure 11).

2.6.2 Résistance de contact thermique (RCT)

Les valeurs de RCT mesurées sont très faibles et impliquent de connaître précisément la conductivité thermique des matériaux concernés (Figure 12). Les propriétés thermiques du Cu sont issues des travaux de [6], celles de l' AgSnO_2 proviennent des caractérisations présentées précédemment. De manière classique on observe une décroissance de la RCT en fonction de la température, liée à la diminution des propriétés mécaniques entre la température ambiante et 400°C. Après 400°C, les valeurs semblent se stabiliser. Cette évolution est similaire à celles obtenues dans d'autres travaux [3] [7].

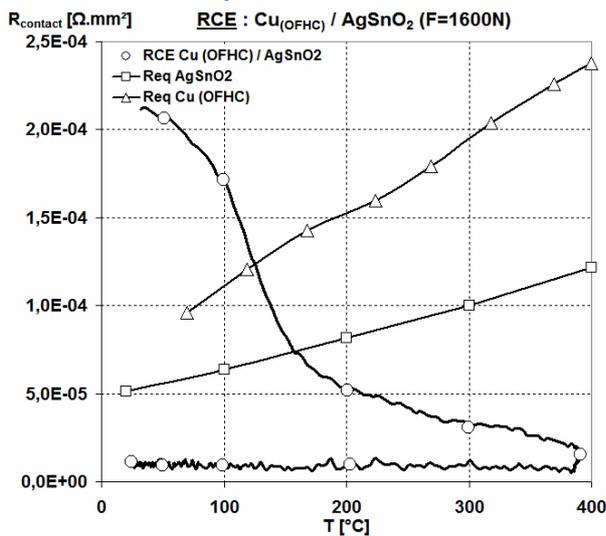


Figure 11 : RCE AgSnO₂ / Cu_(OFHC) = f(T)

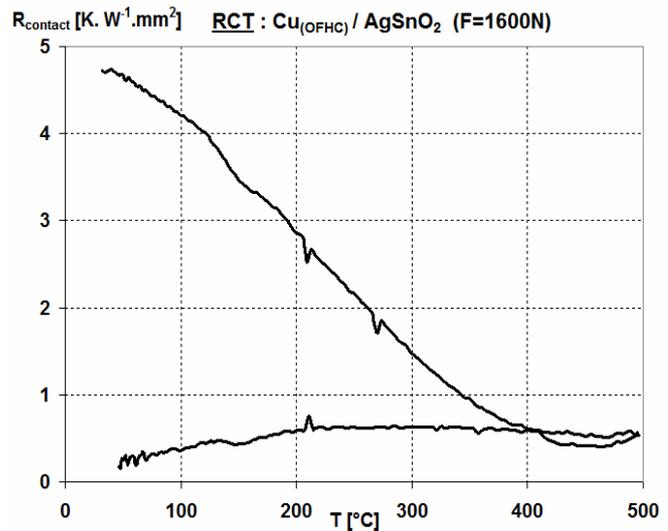


Figure 12 : RCT AgSnO₂ / Cu_(OFHC) = f(T)

3. CONCLUSION

Cette campagne de caractérisation a permis d'établir les évolutions en fonction de la température des propriétés électriques et thermiques du MDC d'une part, et des RC entre MDC et son support cuivre d'autre part. Actuellement, des campagnes de mesure des RCT et RCE des autres couples de matériaux mis en jeux lors du processus d'assemblage (électrode/MDC, Cu/électrode) sont en cours et permettront de compléter la base de données précédemment établie. Des mesures de diffusivité à plus haute température viendront conforter l'estimation de la conductivité thermique à $T > 300^{\circ}\text{C}$. L'ensemble de ces données seront implémentées dans un code de calcul aux éléments finis (SysweldTM) afin de modéliser la phase d'assemblage résistive du MDC sur son support Cu. En outre, une campagne de caractérisation du matériau non densifié [85% - 95%] permettra d'élargir le champ d'action du modèle numérique en intégrant la phase de frittage à celle de l'assemblage, procédé correspondant aux ambitions industrielles.

4. BIBLIOGRPAHIE

- [1] : Z. Feng *et al.* , 1998, An incrementally coupled electrical-thermal-mechanical model for resistance spot welding. *5th International conference on trends in welding research, Pine mountain June 1-5*.
- [2] : E. Feulvarch *et al.* , 2004, Resistance spot welding simulation : a general finite element formulation of electrothermal contact conditions, *Materials Processing Technology*, vol. 153-154, pp. 436-441
- [3] : P. Rogeon *et al.* , 2007, Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 195, pp. 117-124
- [4] : Touloukian, 1970, Thermal conductivity - Metallic elements and alloys. *Plenum publishing corporation, New York - Washington*
- [5] : A. Bonhomme, 2005, Thèse : Comportement à l'usure de pastilles de contacts électriques à matrice argent. *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Evry*
- [6] : A. Monnier, 2006, Thèse : Etude et simulation du soudage par résistance de matériaux de contact. *Faculté des Sciences d'Orsay, Paris-Sud 11^{ème}*
- [7] : N. Pierron, 2006, Thèse : Transferts thermiques lors d'assemblages par laser de feuilles minces : approche numérique et expérimentale. *Université de Bourgogne*