

Modélisation et simulation numérique de la dégradation des électrodes en alliage CuCr1Zr lors du soudage par point

Elise GAUTHIER¹, Cédric POUVREAU¹, Philippe ROGEON^{1*}, Denis CARRON¹, Philippe PILVIN¹

¹Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne
Rue Saint Maudé -56321 Lorient Cedex

*(auteur correspondant : philippe.rogeon@univ-ubs.fr)

Résumé - Cet article porte sur l'étude de la dégradation cyclique des électrodes en CuCr1Zr lors du soudage par points, avec une attention particulière pour l'influence des mécanismes d'adoucissement de l'alliage. Un modèle complet Electrique-Thermique-Métallurgique-Mécanique (ETMM) intégrant une loi de comportement viscoplastique de type Norton identifiée pour l'alliage CuCr1Zr, avec un paramètre d'adoucissement couplé à une cinétique de type Leblond-Devaux, doit permettre de calculer la déformation séquentielle de la face active de l'électrode. Pour l'instant seulement 6 points ont pu être enchaînés numériquement. De bonnes tendances ont été obtenues au plan thermique.

Nomenclature

s déviateur du tenseur des contraintes
 a variable d'adoucissement
 R variable d'érouissage, MPa
 h coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$
 T température, K
 n exposant loi Norton
 K paramètre visqueux, $MPa.s^{1/n}$

Symboles grecs

τ temps d'incubation, s
 σ tenseur des contraintes
 σ_y limite d'élasticité, MPa

Indices et exposants

eq équivalent
 ∞ valeur à l'équilibre

1. Introduction

Le soudage par point est utilisé par l'industrie automobile pour assembler des tôles minces en acier. L'accumulation des points de soudage entraîne une usure des faces actives des électrodes qui est particulièrement aggravée dans le cas du soudage de tôles galvanisées et à haute limite d'élasticité. Les mécanismes de dégradation sont complexes et font intervenir l'adoucissement de l'alliage (vieillessement en lien avec son état de précipitation), la fatigue thermo-mécanique, la contamination par le zinc et l'érosion associée. Ces différents modes de dégradation ont pour conséquence une diminution de la qualité des points de soudure, un remplacement prématuré des électrodes et une usure accélérée des outils de rodage.

La compréhension et la description des différents mécanismes de dégradation des électrodes ont déjà fait l'objet de plusieurs études [1, 2, 3, 4]. Ces auteurs s'accordent sur le fait que la dégradation rapide de la surface de l'électrode est provoquée par une combinaison d'effets mécaniques et thermiques. Deux modes principaux de dégradation sont communément admis : 1) avec les tôles revêtues, la fusion du revêtement de zinc favorise les phénomènes d'inter-diffusion cuivre-zinc et conduit au laitonnage des électrodes. Les laitons

formés favorisent le collage occasionnel des électrodes et la perte de matière lors de leur remontée. 2) L'échauffement important en surface d'électrode par contact avec la tôle adoucit le matériau (recristallisation, dissolution, coalescence des précipités, chute des propriétés mécaniques à chaud) et accélère la déformation plastique de la zone proche de la face active par accumulation cyclique des efforts. L'ensemble de ces phénomènes conduit à l'augmentation des surfaces de contact Electrode/Tôle (E/T). La densité de courant peut diminuer jusqu'au point d'être insuffisante pour former un noyau fondu. En pratique il est donc nécessaire d'augmenter l'intensité du courant, par incrémentations successives, pour compenser l'élargissement des faces actives.

Dong et al. [5] ont utilisé la modélisation et la simulation numérique pour étudier la déformation des électrodes lors du soudage de tôles revêtues. Les calculs électro-thermiques et thermo-mécaniques sont découplés et le modèle permet de simuler 15 points soudés. Pour prendre en compte les différentes couches de laiton qui se forment à la surface des électrodes, ils appliquent les propriétés mécaniques du laiton sur les mailles en face active. Les résultats montrent que des déformations plastiques en face active apparaissent dès le premier point et s'accumulent avec les cycles. Khan [6], et Hou [7] ont déterminé les déformations au niveau de la face active des électrodes dans le cas du soudage de tôle nues, en intégrant dans leur modèle de soudage une loi de comportement thermo-élasto-plastique dans les électrodes. D'autres auteurs [2, 5, 8, 9] ont développé des modèles analytiques spécifiques à chacun des deux mécanismes de dégradation : adoucissement et laitonnage. Ces modèles n'ont pas été intégrés à un modèle numérique de soudage par point qui permettrait de prédire correctement les effets des mécanismes de vieillissement sur la dégradation des électrodes.

La présente étude est menée en partenariat avec les sociétés PSA Peugeot-Citroën et Le Bronze Industriel, et porte sur la compréhension des mécanismes de dégradation des électrodes en CuCr1Zr, avec une attention particulière pour l'influence des mécanismes d'adoucissement de l'alliage cuivreux. L'approche numérique est utilisée pour évaluer la contribution respective des principaux paramètres contrôlant la durée de vie de l'électrode et plus particulièrement pour étudier l'influence des paramètres de soudage. La difficulté provient, d'une part, du caractère multi-physique fortement couplé du problème et, d'autre part, de l'aspect cyclique lié à la répétition des points soudés. Le développement d'un modèle couplé Thermique-Electrique-Métallurgique-Mécanique (ETMM) qui décrive la détérioration séquentielle des électrodes sans pour autant mener à des simulations trop pénalisantes en terme de temps de calcul est donc un point particulièrement délicat qui est abordé dans ce travail. L'originalité réside aussi dans l'implémentation dans le modèle d'une loi de comportement viscoplastique de type Norton identifiée pour l'alliage CuCr1Zr avec un paramètre d'adoucissement couplé à une cinétique de type Leblond-Devaux. Une approche expérimentale complémentaire (essais de soudage instrumentés en microthermocouples) est par ailleurs mise à profit pour valider les calculs et enrichir l'analyse des résultats issus des simulations.

2. Modèle numérique

Ce travail de modélisation s'appuie sur des études expérimentales et numériques menées sur le procédé de soudage par point au LIMatB depuis une dizaine d'années [10, 11, 12]. Ces études ont donné lieu à la caractérisation complète des tôles (propriétés physiques, comportement thermo-mécanique et transformations métallurgiques) ainsi qu'à la caractérisation des résistances de contact électrique et thermique au niveau des interfaces électrode/tôle et tôle/tôle. Les lois de comportement ont été implémentées initialement dans les modèles pour simuler le soudage par point avec comme objectif principal d'étudier la formation et le développement du noyau au sein des tôles. Dans ces premiers modèles, le comportement des électrodes était simplifié et les mécanismes d'adoucissement négligés. Par

ailleurs un seul point soudé était simulé. Dans le modèle de soudage mis en oeuvre dans cette étude à l'aide du logiciel aux éléments finis Sysweld pour étudier la dégradation des électrodes avec l'adoucissement, on reprend intégralement tous les développements concernant les tôles et les interfaces déjà mis au point dans les études précédentes.

L'apport de ce travail réside dans une description plus fine du comportement du matériau en tenant compte des effets des mécanismes de dissolution/coalescence des précipités de Cr en conditions de soudage. Concernant d'abord les propriétés physiques, des différences relativement faibles ont été observées entre les évolutions de la résistivité électrique et de la conductivité thermique avec la température, mesurées sur des échantillons dans des états trempé-revenu (état des électrodes neuves) et trempé-revenu-vieilli. Les propriétés physiques, bien que sensibles aux phénomènes de précipitation, le sont beaucoup moins aux phénomènes de dissolution/coalescence qui surviennent lors du vieillissement activé thermiquement. On considère dans le modèle de soudage que les propriétés physiques de l'électrode ne dépendent que de la température. Par contre, des essais de traction à chaud réalisés sur la machine Gleeble® ont montré l'influence très importante du vieillissement de l'alliage sur les propriétés mécaniques. A partir de ces essais, on a pu identifier une loi de comportement élastoviscoplastique couplée à la cinétique d'adoucissement (dissolution/coalescence des précipités de Cr) pour décrire le comportement thermomécanique de l'alliage CuCr1Zr. Les phénomènes de coalescence et de dissolution des précipités apparaissent pour des histoires thermiques avec des passages à des températures supérieures à 500°C. L'ajout d'une variable de vieillissement dans le modèle permet alors de décrire la chute des propriétés mécaniques relative à ces phénomènes.

Le critère isotrope de von Mises avec une variable d'écrouissage isotrope est utilisé car les essais à température élevée ont montré un très faible effet Bauschinger. Ce critère permet de déterminer en fonction de l'état du matériau la transition entre un comportement thermoélastique ou viscoplastique. En notant F la fonction de charge, ce critère s'écrit (1) :

$$F(\sigma, R) = \sigma_{eq} - \sigma_y(a) - R(a) \quad (1)$$

Avec $\sigma_y(a)$ la limite d'élasticité et $R(a)$ la variable d'écrouissage isotrope. Ces grandeurs dépendent du niveau de vieillissement de l'alliage via la variable interne a . La contrainte équivalente de von Mises, notée σ_{eq} , vaut (2) :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} s : s} \quad \text{avec} \quad s = \sigma - \frac{1}{3} tr(\sigma) I \quad (2)$$

Avec ce critère et la règle de normalité, la loi d'écoulement viscoplastique s'écrit (3) :

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \frac{3}{2} \left(\frac{\sigma_{eq} - \sigma_y(a) - R(a)}{K(a, T)} \right)^{n(T)} \frac{s}{\sigma_{eq}} \quad (3)$$

$n(T)$ et $K(a, T)$ sont les paramètres relatifs aux mécanismes de viscosité. A l'instar de Marquis [13] pour des lois de comportement d'alliages d'aluminium ou de superalliages de nickel durcis par des précipités, on a ajouté dans le modèle une dépendance des grandeurs principales la variable d'adoucissement a , (1) et (3). A haute température, l'écrouissage devient faible et c'est la composante visqueuse de la contrainte qui est la plus sensible à la variable de vieillissement. Cette variable interne représentative du vieillissement est régie par la loi d'évolution (4):

$$\dot{a} = \frac{a_\infty(T) - a}{\tau(T)} \quad (4)$$

Avec $a_{\infty}(T)$ le pourcentage maximal de phase adoucie à la température T et $\tau(T)$ la constante de temps associée à cette cinétique d'ordre 1.

En outre des procédures informatiques spécifiques ont dû être développées pour simuler numériquement l'enchaînement de plusieurs points soudés, et pour les couplages séquentiels entre les calculs Electro-Thermo-Métallurgique et Mécanique lors des phases de soudage.

3. Confrontation expériences-simulations numériques

La validation du modèle ETMM se fait sur la configuration académique de soudage d'une tôle unique d'épaisseur 2 mm en acier doux non revêtu. La suppression de l'interface tôle-tôle simplifie notablement les calculs, et n'empêche pas la formation du noyau. Des essais de soudage ont été réalisés avec les conditions opératoires précisées dans le tableau 1. Le courant électrique utilisé est alternatif de période 50 Hz. Un cycle de soudage comprend différentes phases qui s'enchaînent: accostage, soudage, forgeage, et refroidissement des électrodes. Le temps de cycle (cadence) entre deux points de soudure a été imposée à 2s. 420 cycles de soudage successifs ont été réalisés avec la même paire d'électrodes. Les électrodes sont finement instrumentées avec des thermocoax®. Les thermocoax (TC) sont enfoncés dans des micro-trous (diamètre 0,3 mm) réalisés par fraisage et perçage et positionnés, à 0,5 mm (TC1), 1 mm (TC2) et 1,5 mm (TC3) de la face active de l'électrode et à 0,5 mm de l'axe de révolution pour TC1 et TC2, TC3 étant au niveau de l'axe (Figure 1). Les capteurs sont placés à 120° les uns des autres.

Configuration	F (daN)	I (kA)	$\Delta t_{\text{soudage}}$ (s)	$\Delta t_{\text{forgeage}}$ (s)	t_{cycle} (s)	débit (l/min)
1Tôle 2mm	270	9,6	0,2	0,2	2,0	2,5

Tableau 1 : Paramètres de soudage

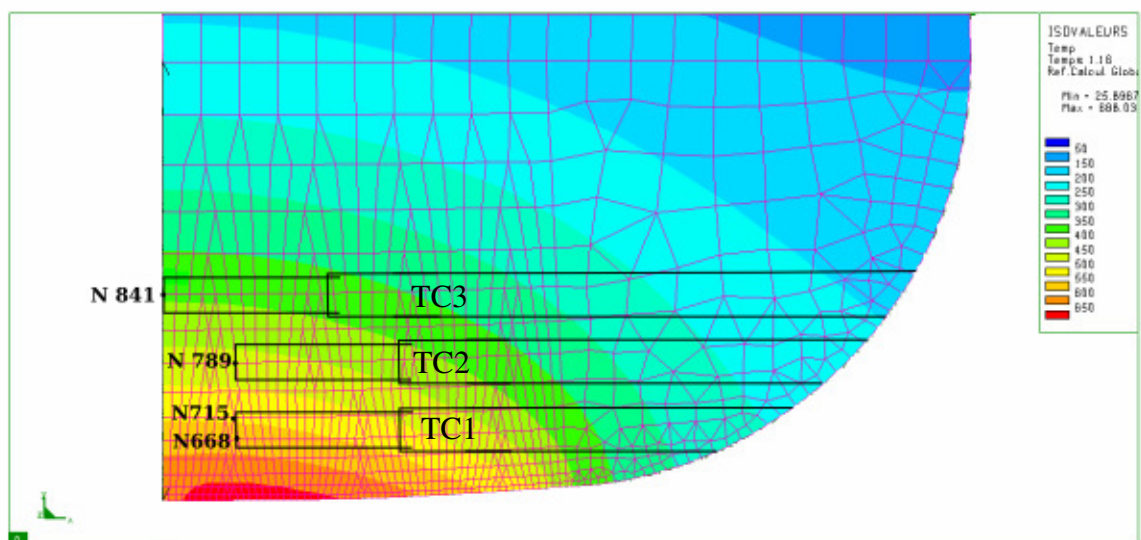


Figure 1 : Position des thermocouples par rapport au maillage et gradients thermiques dans les zones de mesures.

Dans cet article la confrontation entre essais de soudage et simulations numériques, est focalisée sur les aspects thermiques dans les électrodes et la tôle, et sur la déformation de la face active des électrodes.

3.1. Comparaison des cinétiques thermiques dans l'électrode

Les allures des cinétiques thermiques simulées et mesurées au chauffage et au forgeage apparaissent en très bonne adéquation (Figure 2). L'évolution de la montée en température lors de la phase de soudage est en particulier bien décrite. Dans les premiers cycles de soudage les faces actives des électrodes sont convexes et les rayons de contact électrode-tôle (E/T) au début de la phase de soudage sont faibles (~1,3 mm), en accord avec les résultats de Raoulison [12]. En conséquence, au cours d'un cycle, la pression de contact et la densité de courant sont très élevées dans les premiers instants de chaque phase de soudage. Dans ces conditions les résistances de contact électriques aux interfaces E/T sont négligeables et l'échauffement est principalement dû à la génération de chaleur par effet Joule dans les tôles. Pendant la phase de soudage, les rayons de contact E/T augmentent avec l'indentation des électrodes dans la tôle, et la densité de courant diminue jusqu'à la fin de la phase de soudage. L'évolution des rayons de contact E/T pilote l'échauffement des électrodes.

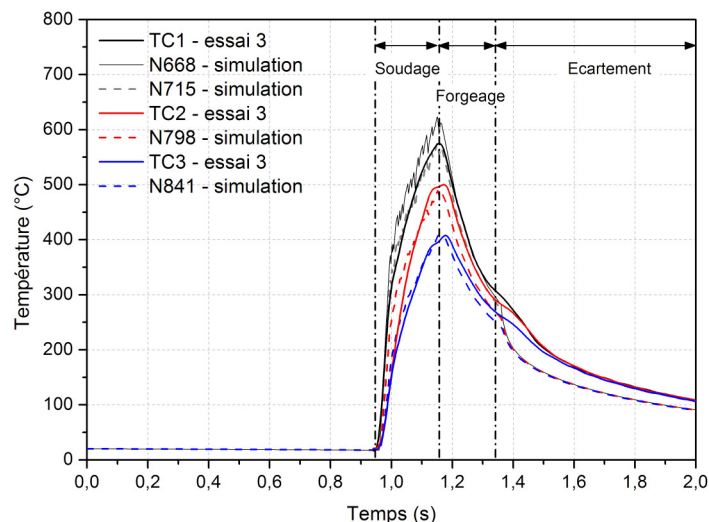


Figure 2 : Comparaison des cinétiques thermiques mesurées et calculées pour le cycle 1.

En outre les températures calculées maximales atteintes en fin de phase de soudage pour les différents cycles sont très proches des valeurs expérimentales (Figure 3). Deux essais de soudage (420 points cyclés), réalisés dans les mêmes conditions, ont conduit à des dispersions relativement faibles sur les températures maximales mesurées (~50°C). Cette dispersion résulte des gradients thermiques relativement importants à l'extrémité de l'électrode dans la zone d'instrumentation (Figure 1), et des incertitudes de positionnement des capteurs. On peut cependant observer que la cinétique de refroidissement calculée au moment de l'écartement des électrodes est surestimée, certainement en raison d'une valeur trop élevée du coefficient d'échange qui a été imposée pour simuler le refroidissement par circulation d'eau froide. La valeur du coefficient (25000 W/m².K) a été établie par bilan enthalpique à partir d'une simulation numérique, avec le logiciel Comsol Multiphysics, des échanges convectifs entre l'eau de refroidissement et la surface d'échange de l'électrode.

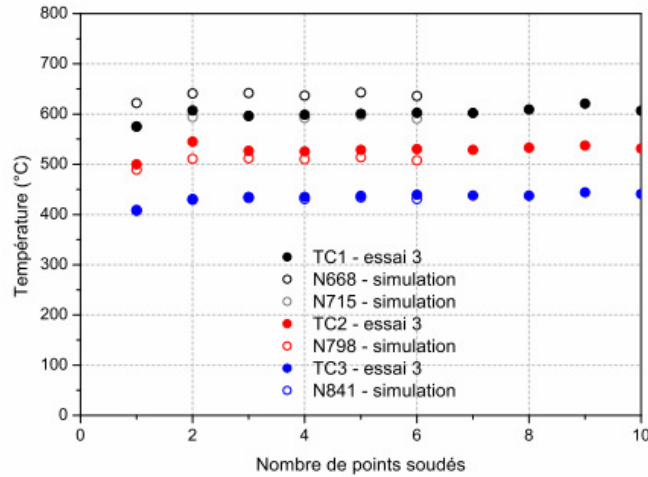
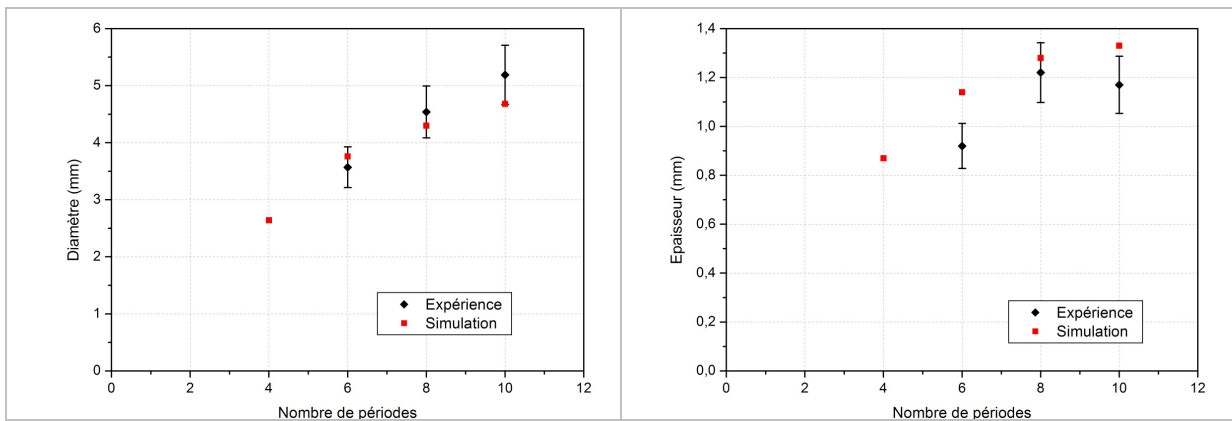


Figure 3 : Comparaison des évolutions des températures maximales calculées et mesurées.

3.2 Comparaison des cinétiques de formation du noyau

Des séries de points de soudure interrompus (à chaque période du courant (0,02 s)) ont été réalisées avec des électrodes neuves, et avec des électrodes ayant soudé 100 points. Il est possible de mesurer les dimensions du noyau (diamètre, épaisseur) à partir des coupes macrographiques réalisées à posteriori, et ainsi de reconstituer la cinétique de développement du noyau fondu. La comparaison des cinétiques de formation du noyau expérimentale et calculée permet de vérifier si les phénomènes électriques et thermiques dans les tôles sont correctement modélisés, dans la mesure où les électrodes sont chauffées principalement indirectement par contact avec les tôles. La comparaison expérience numérique est effectuée dans la configuration de soudage avec électrodes neuves. En simulation, la zone fondue (ZF) apparaît dès la 4^{ème} période de soudage et expérimentalement elle est détectée lors de la 6^{ème} période, mais apparaît très certainement entre la 4^{ème} et la 5^{ème} période (Figure 4).



(a)

(b)

Figure 4: Comparaison des évolutions expérimentales et calculées (a) du diamètre du noyau, (b) de l'épaisseur du noyau avec des électrodes neuves

L'évolution du diamètre est bien prédite, le diamètre calculé se situant dans l'incertitude expérimentale. En revanche des différences plus importantes sont relevées pour l'évolution de l'épaisseur du noyau. Le calcul sur-estime cette épaisseur notamment à la 6^{ème} et la 10^{ème} période.

3.4. Déformation de la face active de l'électrode

Lors des essais de soudage sur l'assemblage d'une tôle double non revêtue de 2mm d'épaisseur, seuls les profils avant soudage et après 20, 60, 100, 210, 420 points soudés ont été relevés (Figure 5). La déformation de la face active s'effectue entre le premier et le 60^{ème} point et se manifeste par l'apparition d'un méplat. Malgré le nombre insuffisant de points soudés calculés, il est possible d'observer les tendances.

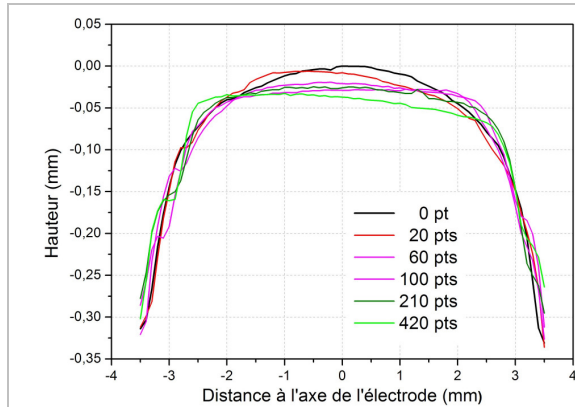


Figure 5 : Evolutions expérimentales du profil 2D des électrodes avec le nombre de points soudés.

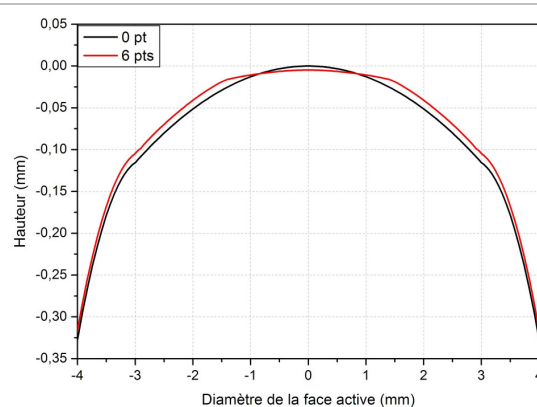


Figure 6 : Comparaison entre le profil 2D initial de la face active d'une électrode neuve et le profil déformé calculé après 6 points soudés.

Après 6 points soudés, un méplat au niveau du centre de la face active commence à se former (Figure 6). La matière est repoussée vers le pourtour du méplat. Ces premiers résultats semblent cohérents avec les observations réalisées lors des essais de soudage.

4. Conclusion

Ce travail porte sur le développement d'un modèle numérique de soudage par points pour prédire la dégradation cyclique des faces actives des électrodes en alliage CuCr1Zr. Le modèle prend en compte les principaux phénomènes physiques et les couplages dans les matériaux et aux interfaces. L'originalité réside dans l'intégration dans le modèle d'une loi de comportement viscoplastique de type Norton identifiée pour l'alliage CuCr1Zr avec un paramètre d'adoucissement couplé à une cinétique d'adoucissement de type Leblond-Devaux. En raison de difficultés numériques générées par l'évolution des conditions de contact, seulement six points soudés enchaînés ont pu être simulés avec le modèle. Cependant les premiers résultats obtenus sont encourageants. Au plan thermique, le modèle décrit bien les évolutions de température dans l'électrode au cours d'une séquence de soudage. Par ailleurs la cinétique de formation du noyau dans la tôle est aussi bien reproduite. Au plan mécanique, même si le nombre de points simulés est insuffisant pour faire une comparaison pertinente avec les essais de soudage, les tendances observées sont intéressantes. En effet la modélisation des déformations des électrodes montre que leur face active commence à s'aplatir dès les premiers points comme ce qui a été observé lors des essais de soudage. Il reste donc dorénavant à résoudre les difficultés numériques, pour pouvoir simuler au moins une centaine de points soudés afin d'obtenir des résultats significatifs en terme de déformations des profils des faces actives et se confronter à l'expérience.

Références

- [1] A. De, L. Dorn, O. Gupta, *Analysis and optimisation of electrode life for conventional and compound tip electrodes during resistance spot welding of electrogalvanised steels*, Science and technology of welding and joining, 5 , 49-57, 2000.
- [2] T. Dupuy, *La dégradation des électrodes lors du soudage par points de tôles d'acier zinguées*, PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1998.
- [3] K. Chan, *Weldability and degradation study of coated electrodes for resistance spot welding*, PhD thesis, University of Waterloo, Canada, 2005.
- [4] VM. Kondo, T. Konishi, K. Nomura, H. KoKawa, *Degradation mechanism of electrode tip during alternate resistance spot welding of zinc coated and uncoated steel sheets*. Science and Technology of Welding and Joining, 15: 76-80, 2010.
- [5] P. Dong, M. Li, M. Kimchi, *Finite element analysis of electrode wear mechanisms : face extrusion and pitting effects*. Science and Technology of Welding and Joining, 3, 59-64, 1998.
- [6] J. Khan, L. Xu, Y. Chao, K. Broach. *Numerical simulation of resistance spot welding process*, Numerical Heat Transfer, Part A : Applications, 37, 425-446, 2000.
- [7] Z. Hou, S. Kim, Y. Wang, C. Li, C. Chen, *Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process*. Journal of Materials Processing Technology, 187, 160-165, 2007.
- [8] S. Babu, M. Santella, W. Peterson, *Modelling resistance spot welding electrode life*. In AWS Welding Shows, Chicago, Illinois, 2004.
- [9] J. E. Gould, W. Peterson, *Analytical modelling of electrode wear occurring during resistance spot welding*. Science and Technology of Welding and Joining, 13 :248-253, 2008.
- [10] P. Rogeon, P. Carre, J. Costa, G. Sibilis, G. Saindrenan, *Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies*, Journal of Materials Processing Technology, 195, 117-124, 2008.
- [11] R. Raelison, A. Fuentes, P. Rogeon, P. Carre, T. Loulou, D. Carron, F. Dechalotte, *Contact conditions on nugget development during resistance spot welding of Zn coated steel sheets using rounded tip electrodes*, Journal of Materials Processing Technology, 212, 1663 - 1669, 2012.
- [12] R. Raelison, A. Fuentes, C. Pouvreau, P. Rogeon, P. Carre, F. Dechalotte, *Modeling and numerical simulation of the resistance spot welding of zinc coated steel sheets using rounded tip electrode: Analysis of required conditions*, Applied Mathematical Modeling, 2013, DOI: 10.1016/j.apm.2013.10.060.
- [13] D. Marquis, H. Costa Mattos, *Modeling of plasticity and aging as coupled phenomena*. Int J. of Plasticity, 7, 865-877, 1991.

Remerciements

Les auteurs remercient les sociétés PSA Peugeot-Citroën et LBI (Le Bronze Industriel) pour leurs conseils et leur support technique, et la région Bretagne pour son soutien financier (bourse ARED ELECSOUD). La machine Gleeble 3500 (utilisée pour la caractérisation thermomécanique), le diffusivimètre à méthode flash LFA 457 NETZSCH et les stations de calcul de l'Université de Bretagne-Sud ont été co-financés par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER).