

Effet du revêtement sur les conditions interfaciales lors du soudage par résistance par point de tôles revêtues

Rija RAOELISON^{1*}, Philippe ROGEON¹, Patrick CARRE¹, Tahar LOULOU¹, Florent DECHALOTTE²

¹ Laboratoire d'Ingénierie des MATériaux de Bretagne, Université de Bretagne Sud, Rue de Saint-Maudé, BP 92116, 56321 Lorient Cedex

² PSA Peugeot Citroën, Centre Technique de Vélizy, Route de Gisy, 78943 Vélizy Villacoublay cedex, France

* (auteur correspondant : rija.raoelison@univ-ubs.fr)

Résumé - Dans ce travail on propose d'étudier et d'appréhender par une double approche expérimentale et numérique le comportement singulier du zinc au niveau des interfaces dans le procédé de soudage par point, avec un intérêt particulier ici pour son influence sur les surfaces de contact. L'effet de macroconstriction à l'interface tôle-tôle dû à la non prise en compte des phénomènes associés à la fusion du revêtement à l'interface tôle-tôle peut être considéré comme négligeable bien que celui existe. La macroconstriction du courant électrique dans l'assemblage est complètement guidée par la surface de contact électrode-tôle qui n'est pas affecté par le comportement du revêtement.

1. Introduction

Dans le procédé de soudage par résistance par point, les conditions interfaciales qui se manifestent par des phénomènes de constriction, à l'échelle microscopique avec les résistances de contact [1-3], et à l'échelle macroscopique avec les variations des surfaces de contact imputables aux formes convexes des faces actives des électrodes [4-6], jouent un rôle fondamental dans la formation du noyau. Les tôles industrielles en acier sont majoritairement revêtues d'une fine couche de zinc de fonction anti-corrosive. En raison de ses propriétés physiques particulières (liées à la température de fusion : 400°C) le zinc influe fortement sur les conditions interfaciales. D'une part, les résistances de contact électriques et thermiques sont environ dix fois plus faibles que sur tôles nues [2,7]. D'autre part, au cours de la phase de soudage le revêtement fond au niveau des interfaces électrode-tôle (E/T) et tôle-tôle (T/T) et vient former un anneau de zinc à la périphérie des contacts [2,8]. En effet, dans le cas de tôle nue, le contact mécanique c'est-à-dire l'empreinte de l'électrode sur la tôle et la zone de contact établie entre les tôles dues à l'effort de soudage exercé sur les électrodes définit le contact électrothermique. Cependant dans le cas de tôles revêtues, un éventuel élargissement de la surface de contact électrothermique aux interfaces semble admissible en raison de l'accumulation de zinc liquide à la périphérie des contacts [9,10]. Il pourrait en résulter une réduction de la densité de courant nécessitant d'augmenter la valeur du courant pour garantir la formation du noyau.

Dans ce travail on propose d'étudier et d'appréhender, par une double approche expérimentale et numérique, le comportement singulier du zinc au niveau des interfaces, avec un intérêt plus particulier pour son influence sur les surfaces de contact pendant la phase de soudage. Un modèle bidimensionnel axisymétrique intégrant les couplages entre les phénomènes électrothermique, métallurgique et mécanique (ETMM) dans les matériaux et aux interfaces implémenté dans le logiciel aux éléments finis Sysweld[®] est utilisé ici pour

simuler numériquement la phase de soudage [11]. Dans ce modèle les couches de zinc et les phénomènes thermomécaniques complexes associés (fusion, expulsion et solidification) qui peuvent avoir des effets éventuels sur les phénomènes de macrostriction du courant électrique dans l'assemblage ne sont pas intégrés au modèle. Seuls les effets du zinc sur les conditions de contacts électrothermiques, entre les tôles et entre tôle et électrode, sont prises en compte à l'aide de paramètres surfaciques de contact (résistances électrique et thermique de contact, coefficient de partage) [11]. Les résistances de contact pour les cas de contacts étudiés (cuivre allié/tôle revêtue, tôle revêtue/tôle revêtue) ont été mesurées sur un dispositif expérimental spécifique en fonction de la pression et de la température et rendent bien compte de l'effet du zinc sur les phénomènes de microstriction [7]. Deux configurations d'assemblage sont envisagées pour étudier séparément l'effet du zinc aux interfaces E/T et T/T : d'abord le cas académique de la tôle équivalente d'épaisseur double sans interface T/T permettant donc de focaliser sur les phénomènes à l'interface E/T, puis le cas classique de l'assemblage symétrique de deux tôles de même nature et de même épaisseur. Des essais de soudage interrompus sur les assemblages étudiés permettent d'obtenir l'évolution des empreintes laissées par la face active des électrodes sur les tôles revêtues ainsi que les cinétiques de formation du noyau à partir de coupes macrographiques. Les simulations seront confrontées à ces observations expérimentales afin d'explicitier le rôle du zinc sur les variations des surfaces de contact d'une part et de valider le modèle d'autre part.

2. Investigations expérimentales

On considère ici le cas de l'assemblage symétrique de deux tôles d'aciers DP6G revêtues de même nature (acier dual phase ferrito-martensitique) et de même épaisseur 0.77mm (cas2T), ainsi que le cas de l'assemblage symétrique constitué d'une tôle d'acier DP6G revêtue d'épaisseur double 1.54mm (cas1T). Sur chaque face des tôles l'épaisseur de la couche de zinc est d'environ 10 μm . Les essais sont réalisés avec des électrodes à embout neuf avec des faces actives convexes de diamètre 6mm et de rayon de courbure 40mm. Dans cette configuration, les paramètres de soudage sont: $F=290\text{daN}$, $I= 8,3\text{kA}$ (valeur efficace) et un temps de soudage de 13 périodes (13~), soit 0.26s. Le courant de soudage envisagé pour les essais se trouve en bas du domaine de soudabilité [$I_{\min}= 8.1\text{kA}$; $I_{\max}= 8.8\text{kA}$] établi. Des essais de soudage interrompus à différents périodes permettent de reconstituer le développement du noyau d'une part, et de déterminer l'évolution des surfaces de contact d'autre part. Des coupes macrographiques sont réalisées par polissage suivi d'une attaque chimique sur les points soudés à partir des sections transversales. Une immersion dans une solution Béchet-Beaujard (solution aqueuse d'acide picrique sursaturée contenant une faible quantité d'agent mouillant, du dodecylbenzènesulfonate efficace pour l'acier DP6G dont le teneur en carbone est de l'ordre de 10%) d'une durée de 5 à 10 minutes révèle avec netteté la zone fondue formée pendant la phase de soudage. Les coupes macrographiques ainsi préparées permettent de bien visualiser le développement du noyau et surtout dans l'intérêt de notre étude d'observer expérimentalement la présence de zinc solidifié à la périphérie des zones de contact aux interfaces E/T et T/T. A partir des coupes macrographiques, on relève aussi le rayon de contact jusqu'au fond d'entaille qui définit la surface de contact mécanique à l'interface T/T en excluant l'anneau de zinc. A l'interface E/T, l'observation sur les coupes macrographiques (cas 1T et 2T) des surfaces des tôles révèle la présence de la couche de zinc à la première période (Figure 1) et sa disparition ainsi que l'existence d'un bourrelet de zinc à partir de la deuxième période (Figure 1). Sous l'effet de la pression, le zinc fondu à l'interface E/T est expulsé à la périphérie du contact. Cependant, le volume de zinc liquide en dessous de la face active de l'électrode déplacé à la périphérie du contact est très faible, notamment au début du soudage, de l'ordre de $0,006\text{mm}^3$ par rapport à l'espace disponible sous la face

active convexe de l'électrode $2,11 \text{ mm}^3$. La très faible quantité de zinc déplacé en périphérie du contact E/T ne devrait pas permettre une augmentation significative de la surface de contact électrothermique. A l'interface T/T, la température de fusion du zinc est atteinte dans les tout premiers instants du soudage ($t < 0,005 \text{ s}$) [12]. Sur la coupe macrographique du point soudé de l'assemblage 2T interrompu à la première période, un espace vide est observable entre les tôles qui se sont écartées au refroidissement. La disparition de la couche de zinc sur la zone de contact est manifeste, un anneau de zinc solidifié est observable en périphérie (Figure 2). A partir de la seconde période le noyau apparaît puis se développe, la présence du zinc à la périphérie du contact T/T est toujours observée (Figure 2). Le volume de zinc déplacé au début du soudage ($0,12 \text{ mm}^3$) est plus important qu'à l'interface E/T et l'espace libre entre les tôles pendant la phase de soudage doit être extrêmement faible. Il est donc possible que le zinc expulsé en périphérie du contact T/T vienne augmenter significativement la surface de contact électrothermique. Ces observations indiquent une contribution potentielle du zinc fondu sur les surfaces de contact électrothermique surtout à l'interface T/T.

Par ailleurs, pour les deux cas d'assemblages (1T et 2T), les empreintes laissées par les électrodes sur les tôles pour différents périodes ont été photographiées (Figure 3) avec un binoculaire équipée d'un dispositif numérique d'acquisition d'image et de mesure. Une estimation du rayon de contact E/T est menée à partir d'observations minutieuses des empreintes et de leurs reliefs à différents grossissements. La présence du bourrelet autour de la zone de contact induit des incertitudes relatives d'environ 10% sur les mesures du rayon de contact considéré axisymétrique. Ces empreintes confirment bien par la faible taille et par l'élargissement progressif du bourrelet de zinc en périphérie du contact E/T, le constat établi précédemment sur la faible quantité de zinc fondu chassée à cette interface et donc l'absence d'effet a priori sur la surface de contact électrothermique.

3. Modèles numériques

La très faible épaisseur des couches de zinc sur les tôles, de même que les phénomènes physiques complexes qui s'y produisent notamment pendant la phase de soudage lors du passage du zinc à l'état liquide rendent difficile leur prise en compte explicite dans les modèles macroscopiques. Un modèle numérique complet ETMM est utilisé pour simuler numériquement la phase de soudage. Dans ce modèle les couches de zinc ne sont pas intégrées explicitement, les tôles sont donc considérées identiquement à des tôles nues, excepté en ce qui concerne les conditions électrothermiques de contact qui traduisent bien avec les paramètres surfaciques de contact utilisés [11], l'imperfection des contacts dans le cas de tôles revêtues. Le modèle géométrique est bidimensionnel axisymétrique vu la forme de révolution de l'assemblage. Les conditions aux limites mécaniques et électrothermiques sont précisées sur la figure ci-dessous (Figure 4). Les simulations ont été conduites avec des propriétés physiques électriques et thermiques, des lois de transformation métallurgique et des lois de comportement thermomécaniques disponibles dans la littérature [2,13,14]. Concernant les aspects mécaniques, essentiels pour le calcul des surfaces de contact, la description du comportement des matériaux est primordiale. Dans notre cas les dilatations et contractions dues aux changements de phase dans les tôles sont prises en compte avec les variations de coefficients de dilatation. Une loi de comportement élasto-plastique à écrouissage isotrope en fonction de la température est retenue pour chacune des phases métallurgiques des tôles. Pour les électrodes, on suppose un comportement purement élastique. Des modèles de contact collant et glissant sont considérés aux interfaces T/T et E/T respectivement. Le critère de contact retenu pour calculer les surfaces de contact est défini pour une valeur non nulle de l'effort normal de contact.

4. Effet du revêtement à l'interface E/T

Dans le cas de l'assemblage 1T, l'évolution du rayon de contact E/T calculé numériquement, apparaît en bonne adéquation avec l'évolution expérimentale issue des empreintes (Figure 7). En outre une bonne concordance entre la cinétique numérique et expérimentale de formation du noyau est de plus observée (Figure 5) avec le noyau qui apparaît numériquement et expérimentalement au début du soudage dès la deuxième période. On constate numériquement et expérimentalement que le noyau après avoir atteint une taille maximale commence à régresser pendant la phase de soudage, phénomène déjà mis en évidence par Rossillon *et al.* [15]. Le bourrelet de zinc qui se forme en périphérie du contact E/T ne semble donc pas modifier de façon conséquente la surface de contact E/T.

5. Effet du revêtement à l'interface T/T

Dans le cas de l'assemblage 2T, l'évolution du rayon de contact T/T calculé numériquement apparaît en bonne adéquation avec l'évolution expérimentale du rayon de contact en fond d'entaille excluant l'anneau de zinc (Figure 7). Notons que la bonne concordance observée entre l'évolution du rayon de contact E/T numérique et expérimental du cas de la tôle double est également vérifiée pour le cas de l'assemblage 2T. En outre un bon accord entre les cinétiques numériques et expérimentales de formation du noyau est également observé (Figure 6). Cependant, dans le cas de l'assemblage 2T, l'hypothèse d'élargissement du contact électrique à l'interface T/T dû à l'expulsion précoce du revêtement fondu semble pertinente compte tenu de la présence d'anneau de zinc observée à la périphérie du contact sur la quasi-intégralité de la phase de soudage (Figure 2). L'augmentation de la surface de contact T/T devrait affecter principalement la macrostriction du courant à cette interface. Les simulations numériques des deux cas de soudage, 2T et 1T, sont comparées afin de montrer l'effet éventuel de la macrostriction du courant électrique à l'interface T/T. Au plan mécanique, les évolutions des rayons de contact E/T sont quasiment identiques entre les deux cas. Au plan électrique les distributions de la densité de courant à différentes périodes du soudage dans le plan de symétrie de l'assemblage (interface T/T pour le cas 2T) sont relativement proches. Les niveaux sont quasiment identiques, cependant une variation plus brusque de la densité est constatée dans le cas 2T juste en bordure de la zone de contact (Figure 8). En fait le courant est majoritairement guidé dans l'assemblage par les deux surfaces de contact E/T qui limitent fortement son épanouissement au niveau de l'interface T/T. Tant que l'épanouissement naturel du courant n'est pas modifié significativement par l'effet de macrostriction dû à la surface de contact T/T, l'influence de ce dernier reste négligeable. Par conséquent l'effet de macrostriction à l'interface T/T dû à la non prise en compte dans le modèle des phénomènes associés à la fusion du revêtement à l'interface T/T peut être considéré comme négligeable bien que celui existe.

7. Conclusion

L'appréhension de l'effet du revêtement de zinc des tôles galvanisées sur les phénomènes de macrostriction aux interfaces E/T et T/T pendant le procédé de soudage par résistance par point a été abordée dans cette étude à partir d'observations expérimentales confrontées à une analyse numérique. A l'interface E/T, le volume de zinc liquide déplacé est faible pour qu'un élargissement potentiel de la surface de contact puisse s'établir. La simulation numérique menée d'abord sur un assemblage d'une tôle équivalente d'épaisseur double sans considération du comportement thermomécanique de la couche de zinc montre une prédiction acceptable de l'évolution du rayon de contact E/T pendant le soudage ainsi qu'une

concordance qualitativement correcte de la cinétique de formation du noyau. A l'interface T/T, sur le plan expérimental la présence manifeste de zinc observée à la périphérie du contact montre un élargissement possible de la surface de contact électrothermique pendant le soudage. La comparaison de la densité de courant à l'interface T/T dans le cas de la simulation numérique d'un assemblage deux tôles à celle au plan de symétrie de la tôle équivalente d'épaisseur double montre un effet moindre de macrostriction. Le calcul ETMM sans considération thermomécanique de la couche de zinc n'est pas pénalisé par l'effet éventuel du zinc sur l'évolution des rayons de contact T/T.

Références

- [1] K.P. Bentley *et al.*, *British Welding Journal* (1963), 613-619.
- [2] G. Sibilia, *Thèse de l'Ecole Polytechnique Universitaire de Nantes* (2003).
- [3] R. Raoelison, Ph. Rogeon, P. Carré, *Congrès SFT Toulouse* (2008), 59-64.
- [4] O.P. Gupta, A. De, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 120 (1998), 246-251.
- [5] J.A. Khan *et al.*, *Science and technology of welding and joining*, 4 (1999), n°4, 201-207.
- [6] Z. Feng *et al.*, *5th International Conference on Trends in Welding Research* (1998).
- [7] R. Raoelison, Ph. Rogeon, P. Carré, *Congrès SFT Marseille* (2007), 1153-1158.
- [8] R. Raoelison, Ph. Rogeon, P. Carré, *Congrès JITH* (2007), 281-285.
- [9] M.V. Li *et al.*, *International Conf. on Computer Technology in Welding*, 923 (1997), 389-398.
- [10] C. Srikunwong, *Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris* (2005).
- [11] E. Feulvarch *et al.*, *Numerical Heat Transfer, Part A*, 49 (2006), 345-367.
- [12] Ph. Rogeon *et al.*, *Journal of Heat Transfer*, 131 (2009), 022101, 1-11.
- [13] E. Thieblemont, *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine* (1992).
- [14] Base de données Sysweld, Sysweld®.
- [15] F. Rossillon *et al.*, *SNS* (2008), 20-24.

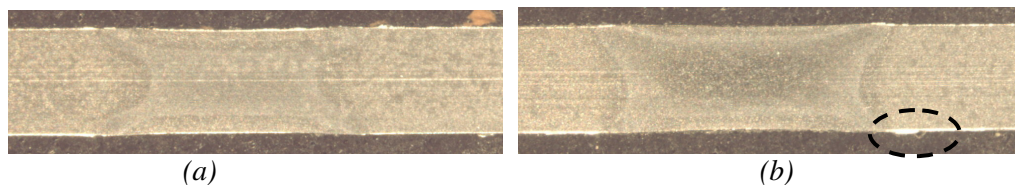


Figure 1 : Coupes macrographiques d'un point soudé cas 1T interrompu à la première période (a) et deuxième période (b) montrant la présence d'anneau de zinc à la périphérie du contact (b).

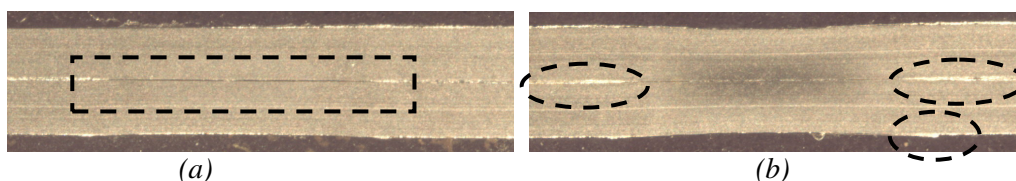


Figure 2 : Coupes macrographiques d'un point soudé cas 2T interrompu à la première période (a) et deuxième période (b). Observation d'un espace vide entre les deux tôles (a) et de la présence d'anneau de zinc à la périphérie du contact E/T et T/T (b).

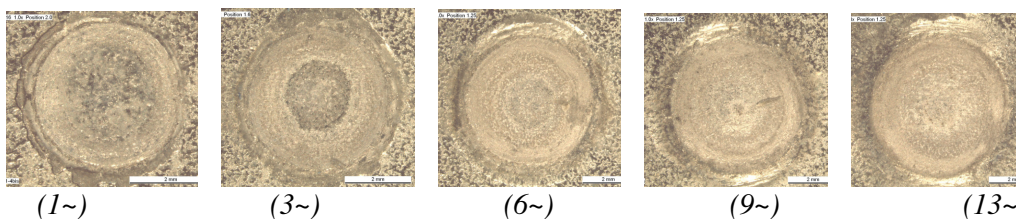


Figure 3 : Echantillons d'images correspondant au cas 1T mettant en évidence les empreintes de la surface active des électrodes sur les tôles à différentes périodes.

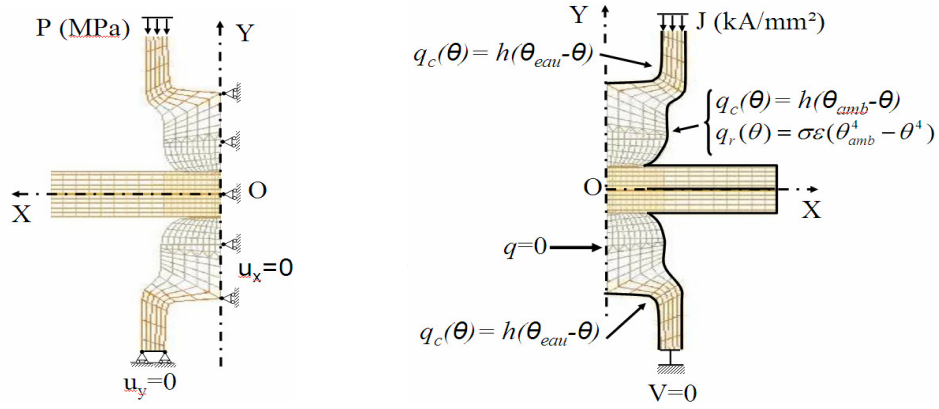


Figure 4 : Schématisation des conditions aux limites mécanique et électrothermique.

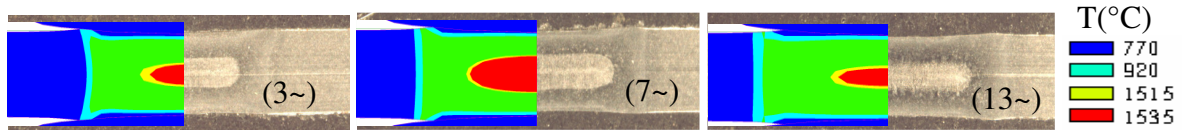


Figure 5 : Comparaison du développement numérique et expérimental du noyau (cas 1T).

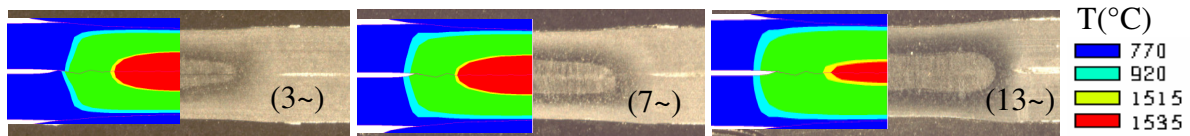


Figure 6 : Comparaison du développement numérique et expérimental du noyau (cas 2T).

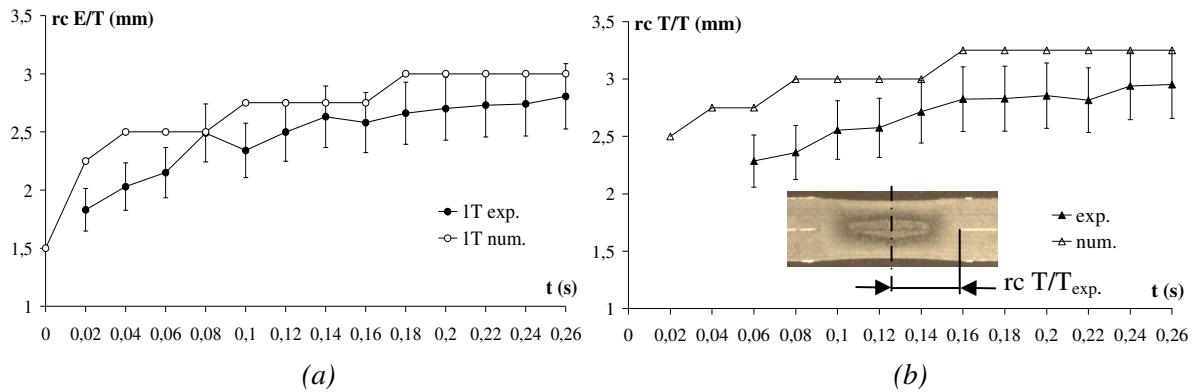


Figure 7 : (a) Comparaison de l'évolution des rayons de contact E/T numérique et expérimentale (cas 1T). (b) Comparaison de l'évolution du rayon de contact T/T numérique et expérimental (cas 2T).

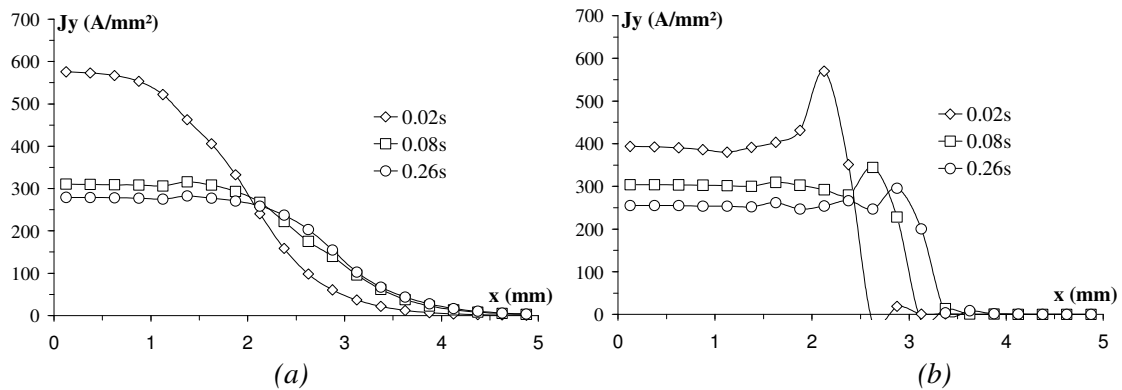


Figure 8 : Confrontation des prédictions numériques à différentes périodes du soudage de la densité de courant dans le plan de symétrie de l'assemblage pour le cas 1T (a) à celle à l'interface T/T pour le cas 2T (b).