HAL open science

Etude de l'influence des conditions interfaciales sur le développement du noyau lors du soudage par résistance par point

Rija Raoelison, Cedric Pouvreau, Philippe Rogeon, Patrick Carre, Tahar Loulou, Florent Dechalotte

To cite this version:

Rija Raoelison, Cedric Pouvreau, Philippe Rogeon, Patrick Carre, Tahar Loulou, et al.. Etude de l'influence des conditions interfaciales sur le développement du noyau lors du soudage par résistance par point. 10e colloque national en calcul des structures, May 2011, Giens, France. pp.Clé USB. hal-00592959

HAL Id: hal-00592959

https://hal.science/hal-00592959

Submitted on 3 May 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude de l'influence des conditions interfaciales sur le développement du noyau lors du soudage par résistance par point

R. Raoelison[1,2], C. Pouvreau[1], Ph. Rogeon [1], P. Carré [1], T. Loulou[1], F. Dechalotte [3]

[1] *LIMATB, Université de Bretagne Sud, France, philippe.rogeon@univ-ubs.fr*
[2] *Laboratoire Roberval, Université de Technologie de Compiègne, France, rija-nirina.raoelison@utc.fr*
[3] *PSA Peugeot Citroën, Centre Technique de Vélizy, France, florent.dechalotte@mpsa.com*

Résumé — L'étude porte sur le rôle des conditions interfaciales dans le développement du noyau lors du soudage par point. Des essais de soudage interrompus, à chaque période, sont réalisés sur des assemblages symétriques de deux tôles en acier revêtues avec des jeux d'électrodes neuves à face active rayonnée d'une part, et usagées à face active plate d'autre part. Deux modèles numériques, un pour chaque configuration d'électrode, intégrant les couplages entre les principaux phénomènes physiques dans la matière et aux interfaces sont mis au point et validés.

Mots clefs — Soudage par point, tôles revêtues, simulation numérique, interface, contact électro-thermo-mécanique.

1 Introduction

Le procédé de soudage par résistance par point est la solution prépondérante d'assemblage des caisses en blancs des véhicules. Face à l'émergence de configurations d'assemblages complexes et en raison de la réduction des temps impartis aux projets, le recours à la simulation numérique s'impose pour la prévision de la soudabilité et l'établissement des référentiels de soudage. Dans ce procédé de soudage, les conditions interfaciales qui se manifestent par des phénomènes de constriction, à l'échelle microscopique avec les résistances de contact [1-4], et à l'échelle macroscopique avec les variations des surfaces de contact imputables à la forme convexe des faces actives des électrodes [3, 4], 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 sa basse température de fusion (400°C), le zinc influe sur les conditions interfaciales. D'une part, les résistances de contact électriques et thermiques sont environ dix fois plus faibles que sur tôles nues [3-5]. 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 [2-4]. Dans le cas de tôles nues, 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 par les électrodes définissent les aires de contact électrothermique (E/T) et T/T). Dans le cas de tôles revêtues, l'accumulation de zinc liquide à la périphérie des contacts peut entraîner un éventuel élargissement de la surface de contact électrothermique aux interfaces [3, 4].

Au fur et à mesure de la réalisation des points de soudure, le profil des faces actives des électrodes initialement rayonné s'érode et s'aplatit. On s'intéresse ici à l'étude de la conséquence de l'aplatissement du profil de face active des électrodes sur la formation et le développement du noyau au sein des tôles. Deux configurations extrêmes de soudage sont envisagées, la première avec des électrodes neuves à face active convexe, et la seconde avec des électrodes à face active plate correspondant à des électrodes usagées ayant fait un grand nombre de points. Une double démarche expérimentale et numérique est utilisée. D'une part des essais de soudage interrompus sur les assemblages étudiés permettent d'obtenir l'évolution des empreintes laissées par la face active convexe ou plates des électrodes sur les tôles revêtues ainsi que les cinétiques de formation du noyau à

partir de coupes macrographiques. D'autre part, à l'instar de [6-9], des modèles numériques sont mis en œuvre à l'aide du logiciel aux éléments finis Sysweld® pour mettre en évidence le rôle des conditions interfaciales sur le développement du point dans les deux configurations.

2 Configurations de soudage

Deux campagnes d'essais de soudage ont été réalisées sur des assemblages symétriques de deux tôles revêtues, la première avec des électrodes neuves et la seconde avec des électrodes usagées aplaties. Les électrodes sont en alliage Cu-Cr-Zr (Cr:1%, Zr:0,3%) présentant, dans l'état neuf et à température ambiante, les propriétés mécaniques suivantes : E= 122 GPa (module d'Young) et $Rp_{0,2}$= 500 MPa (limite d'élasticité à 0,2% de déformation). Pour les électrodes neuves le diamètre de la face active est 6 mm et son rayon de courbure 40 mm. Après 300 points de soudure, l'usure des faces actives des électrodes est significative, et le profil initial rayonné s'aplatit, surtout lors du soudage de tôles revêtues (Figure 1). Des tôles revêtues en acier à haute limite élastique DP6G, présentant les propriétés mécaniques suivantes à température ambiante (E= 211 GPa, $Rp_{0.2}$=400 MPa), sont utilisées pour les tests de soudage. Les assemblages sont constitués de deux tôles identiques d'épaisseur 0,77 mm. L'épaisseur du revêtement est de 10 µm. Pour cette configuration d'assemblage symétrique les paramètres de soudage ont été déterminés à l'aide de la norme PSA E.34.03.180.G :

• Force F = 290 daN

• Courant (50 Hz) I_{eff} = 8,3 kA (électrode neuve rayonnée) et I_{eff} = 10,1 kA (électrode usagée aplatie)

• Durée de la phase de soudage = 13 cycles de 0,02s (0,26s)

• Durée de la phase de forgeage =11 cycles de 0,02s (0,22s)

Des séries de points de soudure interrompus ont été réalisées à différentes périodes dans les deux configurations d'électrodes. À partir des coupes macrographiques il a été possible de suivre la formation et le développement du point soudé dans les deux cas (Figure 2), et de déterminer, dans la configuration électrode à face active rayonnée, l'évolution du rayon de contact T/T à fond d'entaille (Figure 3a). De plus, pour cette configuration, la mesure du diamètre extérieur des empreintes laissées par les électrodes sur les tôles (Figure 4), permet de déterminer l'évolution de la surface de contact électrode-tôle (Figure 3b).

3 Modèles numériques ETM et ETMM

Dans la configuration électrode à face active plate, un modèle bidimensionnel axisymétrique intégrant les couplages entre les phénomènes Electro-Thermiques, et Métallurgique (ETM) dans les matériaux et aux interfaces est mis en œuvre à l'aide du logiciel aux éléments finis Sysweld® pour simuler numériquement la phase de soudage [10, 11]. Les couches de zinc et les phénomènes thermomécaniques complexes associés (fusion, expulsion et solidification) ne sont pas intégrés directement au modèle. Les rayons de contact E/T et T/T sont considérés constants. Le rayon de contact E/T est pris égal à celui de la face active de l'électrode (3mm). Au niveau de l'interface T/T les observations à partir des coupes macrographiques confirment, dès les premiers instants, la présence de zinc solidifié en fond d'entaille (Figure 5) [2]. Pour prendre en compte la présence de l'anneau de zinc et son effet potentiel sur les phénomènes de macroconstriction du courant électrique au niveau de l'interface T/T, le rayon de contact T/T est fixé à 3,6mm. En outre les effets du zinc sur les conditions de contacts électrothermiques E/T et T/T sont pris en compte à l'aide de paramètres surfaciques de contact (résistances électrique et thermique de contact, coefficient de partage) [10]. Les résistances de contact pour les cas de contact étudiés (cuivre allié/tôle revêtue, tôle revêtue/tôle revêtue), ont été mesurées sur un dispositif expérimental spécifique en fonction de la température et à une pression proche des conditions de soudage (~100 MPa) (Figure 6) [5]. Ils rendent bien compte de l'effet du zinc sur les phénomènes de microconstriction. Dans le cas d'un contact électrothermique, la valeur du

coefficient de partage peut être prise égale à 0,5 [12, 13]. Par ailleurs les propriétés électriques, thermiques et métallurgiques des matériaux étudiées sont extraites de la littérature [1, 2]. Les tôles sont assimilées à des matériaux multiphasés, dont les propriétés thermophysiques, calculées à partir de lois de mélange, dépendent de la température et d'une variable d'avancement associée à une cinétique réactionnelle. Enfin les enthalpies de transformation sont prises en compte.

Dans la configuration électrode à face active convexe, le modèle ETM est couplé à une analyse mécanique qui permet de calculer en fonction du temps les évolutions des aires de contact mécanique qui sont assimilées aux surfaces apparentes de contact électrothermique E/T et T/T. Les effets potentiels du zinc d'accroissement des surfaces de contact E/T et T/T ne sont pas pris en considération ici. Deux paramètres seront optimisés pour affiner la prédiction de la variation des surfaces de contact E/T et T/T : la fréquence du couplage avec l'analyse mécanique (macro pas de temps) et la densification du maillage au niveau des interfaces. La limite de la zone de contact électrothermique peut être définies au choix selon deux critères : soit un critère d'écartement ε entre les tôles, le choix de la valeur de ε reste très subjectif [3], soit un critère d'effort normal de contact non nul (retenu ici) [4]. Les calculs mécaniques ont été conduits avec des propriétés thermomécaniques disponibles dans la base de données Sysweld®. Pour le Cu-Cr-Zr une loi de comportement de type thermo-élastique est considérée, tandis que pour le DP6G une loi de comportement thermo-élasto-plastique est retenue, avec prise en compte des déformations métallurgiques et d'une restauration de l'écrouissage à la température de fusion, mais sans plasticité de transformation. Le modèle de contact mécanique considéré au niveau des deux interfaces E/T et T/T (option Slide Line 2D) est prévu pour la modélisation du contact entre solides déformables et permet de considérer entre les surfaces en contact trois types de conditions : glissant/collant/frottant. Dans notre cas les conditions 'glissant' et 'collant' seront considérés aux contacts E/T et T/T respectivement. La méthode de pénalité est utilisée pour limiter l'interpénétration des surfaces lorsque la température s'élève et que les propriétés des matériaux s'effondrent. Cette méthode vise à introduire une rigidité fictive supplémentaire entre les surfaces en contact limitant leur déplacement relatif. A l'issu de la phase d'accostage, en raison de la forme convexe des faces actives des électrodes, les surfaces de contact E/T et T/T sont faibles, ce qui conduit à des niveaux de pression très élevés (environ 800 MPa) (Figure 7). A ces niveaux de pression les résistances de contact deviennent négligeables [3]. Lors de la phase de soudage, les surfaces de contact augmentent et la pression diminue (Figures 3, 7), mais les températures interfaciales sont rapidement très élevées (Figure 8a), ce qui permet de considérer des contact électro-thermique parfaits au niveau des interfaces E/T et T/T.

4 Résultats et discussion

4.1 Configuration de soudage avec des électrodes à face active aplaties

Avec les électrodes à embouts plats, on peut observer à partir des macrographies que le noyau (zone à structure de solidification dendritique) apparaît vers la 8ème période et que sa taille continue de progresser jusqu'à la fin du soudage (Figure 2). La simulation numérique avec le modèle ETM est concordante avec l'observation. L'apparition de la zone fondue se produit aussi vers la 8ème période et sa taille évolue de façon monotone. Les dimensions finales du noyau calculé, épaisseur et diamètre, sont cohérentes avec les valeurs expérimentales. L'évolution de la température au centre de l'assemblage est singulière et présente deux régimes thermiques (Figure 8a). D'abord une montée rapide jusqu'à 450°C, imputable à la RCE(T/T) dont la valeur s'écroule justement vers 450°C (Figure 6a), puis une montée plus lente due à la dissipation thermique au sein des tôles dont la résistivité croît avec la température [2, 4]. La RCE(T/T) joue bien ici le rôle d'étincelle dans le processus d'échauffement. Ceci se retrouve au niveau de l'évolution de la résistance dynamique de l'assemblage (Figure 8b) qui suit pendant le 1er cycle ($t<0,02s$) l'évolution de la RCE(T/T), puis augmente de façon monotone avec la résistivité des tôles jusqu'au temps final. Les hypothèses retenues dans le modèle ETM, avec les rayons de contact E/T et T/T constants, s'avèrent donc satisfaisantes et bien adaptées pour simuler numériquement le soudage par point avec des embouts usagés.

4.2 Configuration de soudage avec des électrodes neuves à face active rayonnées

Avec les électrodes neuves à faces actives rayonnées, le noyau apparaît dès le second cycle (Figure 2). Si on identifie le noyau à la zone à structure dendritique, on peut constater que son épaisseur augmente très rapidement dans les premiers instants, atteint au 3ème cycle sa valeur maximale, puis décroît jusqu'au temps final. Par contre son diamètre croît continûment au fur et à mesure de l'indentation de l'électrode dans la tôle. Aussi les évolutions des rayons de contact rcE/T et rcT/T calculées sont bien concordantes, avec les évolutions relevées à partir des empreintes, et avec les rayons à fond d'entailles mesurés sur les coupes macrographiques, respectivement (Figure 3). Pour bien décrire les évolutions des rayons de contact E/T et T/T, les calculs ont été menés avec une valeur optimisée du macro pas de temps de couplage de 0,0025s (1/8 cycle) et avec un raffinement du maillage poussé au niveau de l'interface E/T (maille de largeur 0,05mm) (Figure 9).

Avec le modèle numérique ETMM les limites de la zone fondue sont assimilées aux isothermes 1515-1535°C. La zone fondue calculée se forme très tôt, et son épaisseur passe par un maximum à la 3ème période pour ensuite décroître jusqu'au temps final. En effet l'accroissement rapide de la surface de contact E/T régule automatiquement l'échauffement (Figure 3a). Les lignes de courant/flux sont guidées principalement par la surface de contact E/T. Dans la configuration d'électrodes avec face active convexe, c'est le paramètre majeur qui contrôle la dynamique d'échauffement de l'assemblage en diminuant la densité de courant, et en augmentant les flux thermiques de fuite vers les électrodes thermostatées, au cours de la phase de soudage. Le rayon de contact T/T qui est systématiquement plus élevé que le rayon de contact E/T (Figure 3b) ne vient pas influer significativement sur la macroconstriction du courant dans l'assemblage principalement guidé par le rayon de contact E/T [3]. Ceci vient confirmer l'hypothèse de négliger ici l'effet d'accumulation du zinc en fond d'entaille T/T. Le diamètre de la zone fondue suit une évolution monotone et augmente jusqu'au temps final de soudage avec l'accroissement des surfaces de contact E/T et T/T. Donc une partie du noyau a solidifié pendant la phase de soudage avec des cinétiques de refroidissement lentes favorables à une structure à grains fins, différentes de la structure de trempe dendritique, et qui se confond sur les coupes macrographiques avec les microstructures de la zone affectée thermiquement. L'évolution de la résistance dynamique de l'assemblage est très différente du cas électrode à face active plate (Figure 8b), avec un pic au début du soudage qui coïncide avec des valeurs faibles de la surface de contact E/T et une augmentation rapide de la résistivité des tôles avec la formation quasi instantanée du noyau, puis avec une décroissance monotone consécutive à l'accroissement de la surface de contact E/T. Avec les hypothèses consenties, contacts E/T et T/T parfaits et non prise en compte des effets du zinc sur les surfaces de contact, le modèle ETMM permet de prédire une cinétique de formation et de développement du noyau conforme avec les observations dans la configuration électrodes neuves à face active convexe.

5 Conclusion

Cette étude a porté sur l'influence des conditions interfaciales sur le développement du noyau fondu lors du procédé de soudage par résistance par point. Deux configurations de soudage ont été envisagées et comparées, la première avec des électrodes neuves à face active rayonnée et la seconde avec des électrodes usagées à face active aplatie. Deux approches expérimentale et numérique ont été menées en parallèle. Des coupes macrographiques et des images d'empreintes ont été effectuées à partir des essais de soudage interrompus réalisés sur des assemblages symétriques de deux tôles revêtues HLE (DP6G). La dynamique de formation du noyau est fortement dépendante du profil de face active des électrodes. Avec des électrodes à face active rayonnée le noyau fondu apparaît dès les premiers cycles avec une épaisseur maximale atteinte dès le 3ème cycle. La surface de contact E/T évolue très rapidement dans les premiers cycles suite à l'indentation de l'électrode dans la tôle, et pilote les valeurs de la densité de courant dans l'assemblage et des flux de chaleur de fuite qui remonte vers les électrodes thermostatées. Dans ce cas les très fortes pressions initiales de contact affaiblissent considérablement les résistances de contact qui jouent un rôle négligeable dans le processus

d'échauffement de l'assemblage. Avec des électrodes à surface active aplatie, les surfaces de contact E/T et T/T sont plus larges et restent constantes au cours de la phase de soudage. Le noyau dans se cas se forme plus tardivement, seulement à partir du 8ème cycle dans notre cas, et sa taille progresse de façon monotone jusqu'au temps final de soudage. Dans cette configuration la pression de contact relativement faible conduit à des valeurs de résistance de contact électrique T/T élevées qui jouent le rôle d'étincelle dans le mécanisme d'échauffement. Dans les premiers instants une forte énergie est générée au niveau de l'interface T/T qui permet dans les instants ultérieurs d'amorcer la dissipation interne au sein des tôles par l'augmentation de leur résistivité avec la température.

Références

[1] E. Thieblemont, "*Modélisation du soudage par résistance par point*", Thèse de doctorat, INPL, 1992.

[2] G. Sibilia, "*Modélisation du soudage par point - Influence des conditions interfaciales sur le procédé*", Thèse de Doctorat, Polytechnique Nantes, 2003.

[3] C. Srikunwong, "*Modélisation du procédé de soudage par point*", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.

[4] R. Raoelison, "*Etude et Modélisation des conditions interfaciales dans le procédé de soudage par résistance par point* ", Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Sud, 2010.

[5] P. Rogeon, P. Carré, J. Costa, G. Sibilia, G. Saindrenan, "*Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies*", JMPT, Volume 195, Issues 1-3, 1, Pages 117-124, 2007.

[6] O.P. Gupta, A. De, "*An improved numerical modelling for resistance spot welding process and its experimental verification*", Journal of manufacturing science and engineering, Vol.120, pp.246-251, May 1998.

[7] Z. Feng, S.S. Babu, M. Santella, B.W. Riemer, J.E. Gould, "*An incrementaly coupled electrical-thermal-mechanical model for resistance spot welding*", 5th Int. conference on trends in welding research, Pine Mountain, GA, 1-5 June 1998.

[8] J.A. Khan, L. Xu, Y.J. Chao, "Prediction of nugget development during resistance spot welding using coupled thermal-electrical-mechanical model", *Science ant technology of welding and joining*, Vol.4, No.4,pp 201-207, 1999.

[9] Wei, P.S., Wang, S.C., Lin, M.S., "*Transport phenomena during resistance spot welding"*, JHT, 118, 762-773, 1996.

[10] Feulvarch, E., Robin, V., Bergheau, JM., *Resistance spot welding simulation, a general finite element formulation of electrothermal contact conditions*, JMPT, vol. 153-154, 436-441, 2004.

[11] E. Feulvarch, Ph. Rogeon, P. Carré, V. Robin, G. Sibilia, J-M. Bergheau, "*Resistance spot welding process : experimental and numerical modeling of the weld growth mechanisms with consideration of contact condition*", NHT, part A, 49: 345-367, 2006.

[12] G. Le-Meur, B. Bourouga, J.P. Bardon, "*Microscopic analysis of interfacial electrothermal phenomena - definition of a heat generation factor*", IJHMT 49, pp. 387-401, 2006.

[13] P. Rogeon, R. Raoelison, P. Carré, F. Dechalotte, "*A microscopic approach to determine electro-thermal contact conditions during resistance spot welding process*", JHT, vol.111, Iss.2, 2008.

Figures

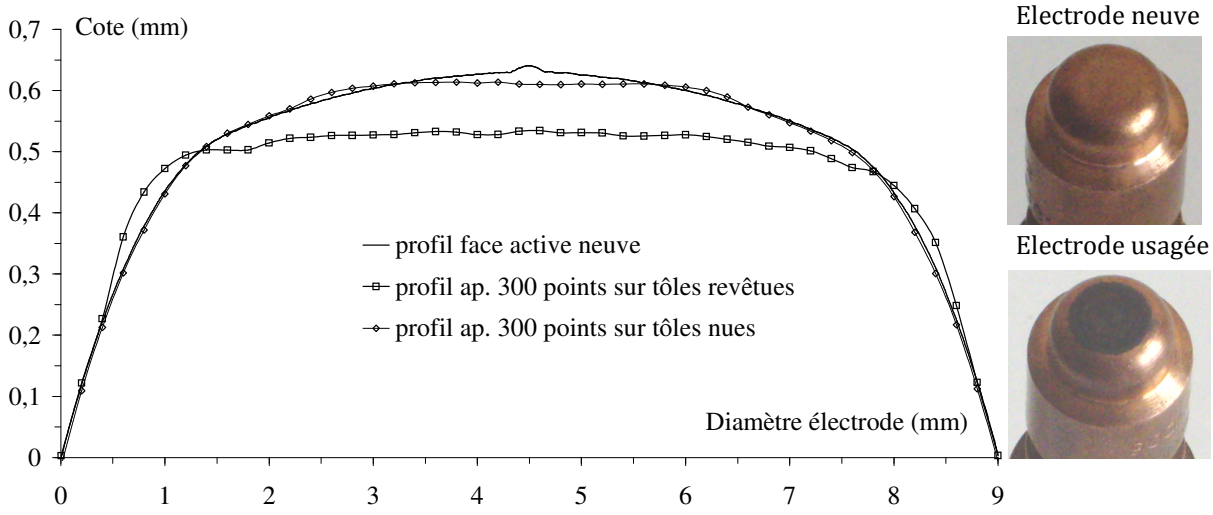


FIG. 1- Comparaison entre le profil de face active d'une électrode neuve et ceux d'électrodes usagées.

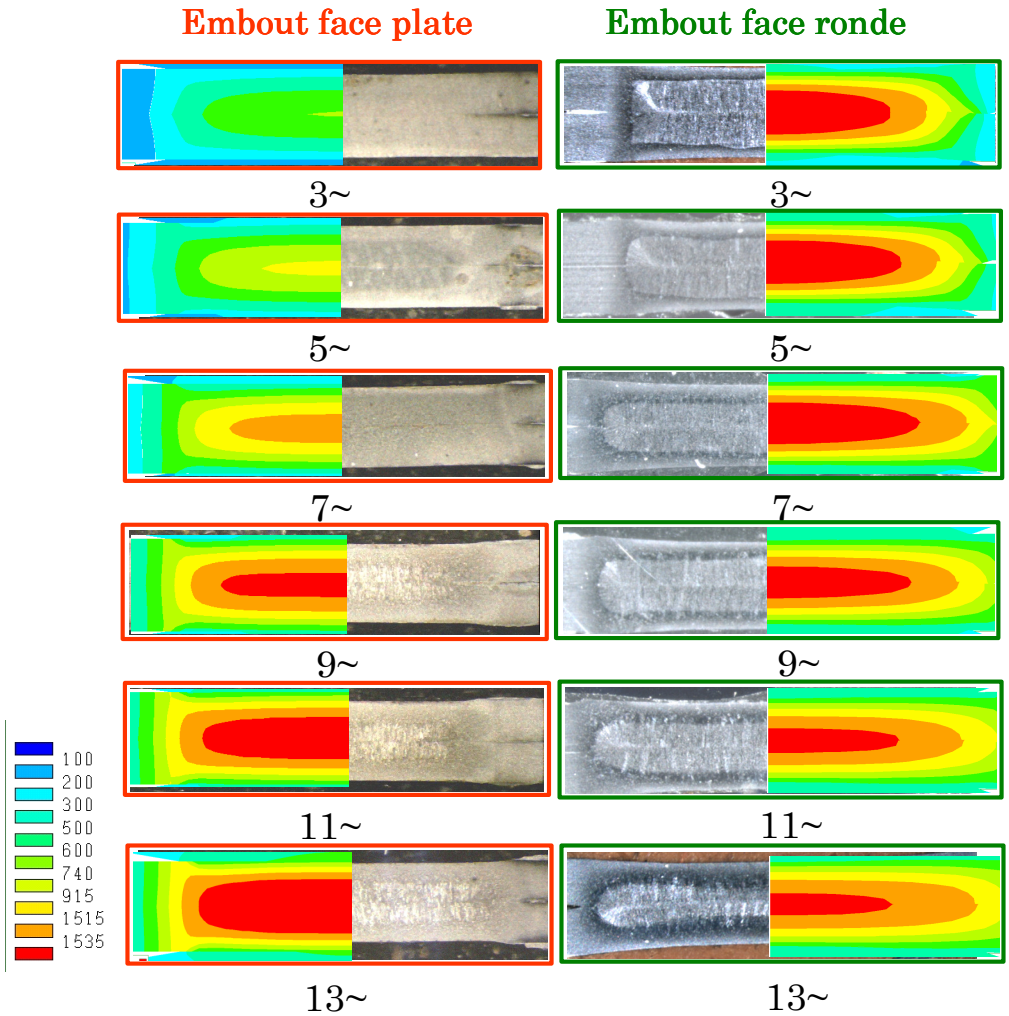


FIG. 2 - Comparaison des cinétiques de développement de noyau expérimentales et numériques dans les deux configurations électrodes neuves à embouts rayonnés et électrodes usagées à embouts aplatis.

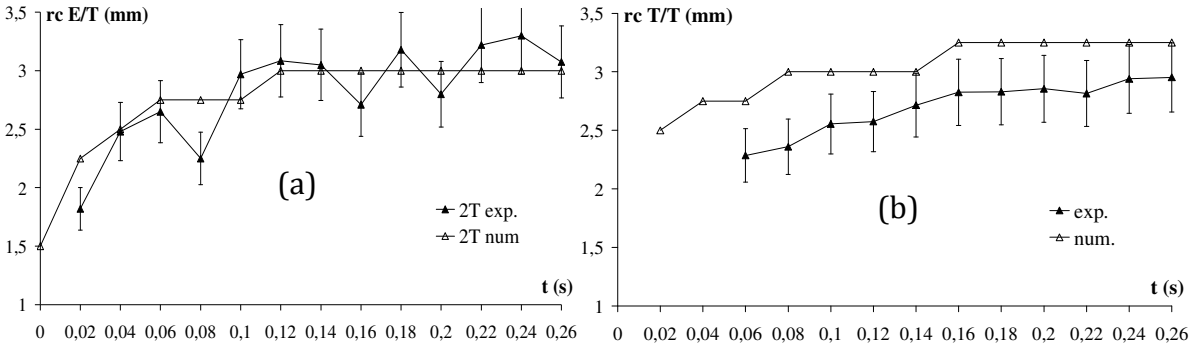
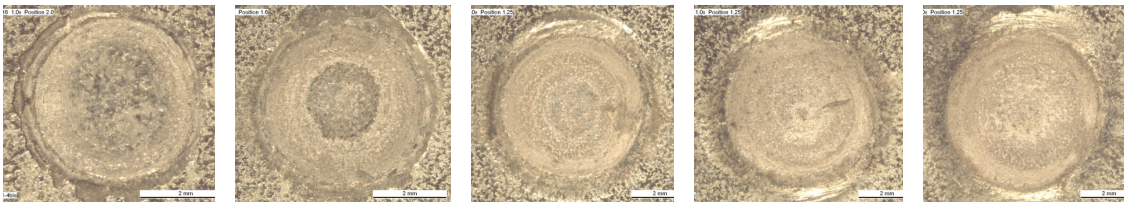
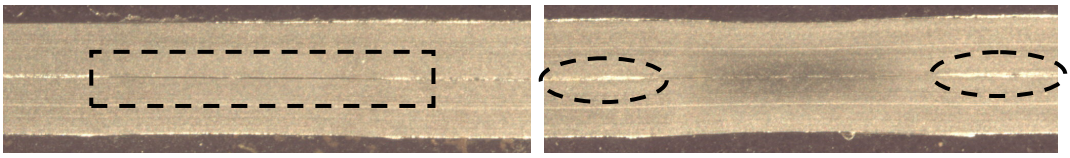


FIG. 3 - Comparaison des évolutions numériques et expérimentales des rayons de contact E/T (a) et T/T (b) dans la configuration électrodes neuves à embouts rayonnés.



(1~) *(3~)* *(6~)* *(9~)* *(13~)*

FIG.4 - Echantillons d'images mettant en évidence les empreintes de la surface active des électrodes sur les tôles à différentes périodes.



(a) *(b)*

FIG. 5 - Coupes macrographiques d'un point soudé interrompu à 1~ (a) et à 2~ (b). Observation d'un espace vide entre les deux tôles (a) et d'un anneau de zinc à la périphérie du contact T/T (b).

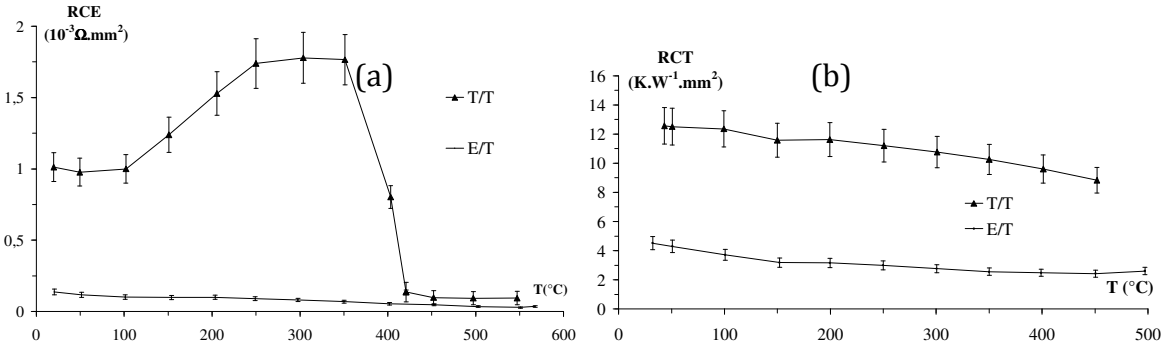


FIG. 6 - Evolution des résistances de contact électrique (a) et thermique (b) aux interfaces E/T et T/T en fonction de la température et à la pression de 80 MPa

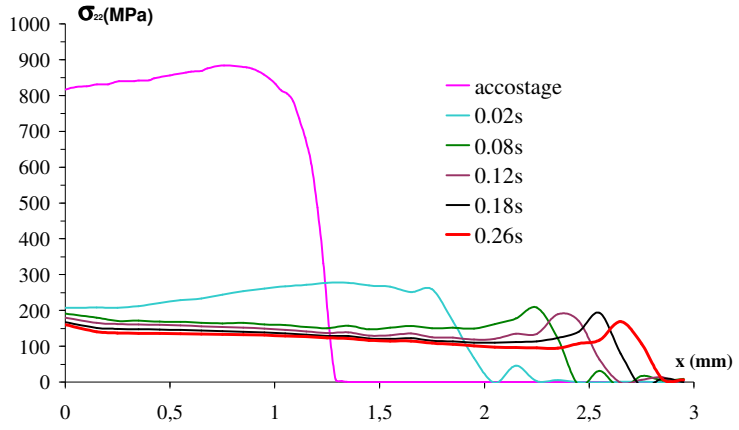


FIG. 7 - Distribution de la contrainte normale à l'interface E/T (côté Tôle) à l'issue de l'accostage

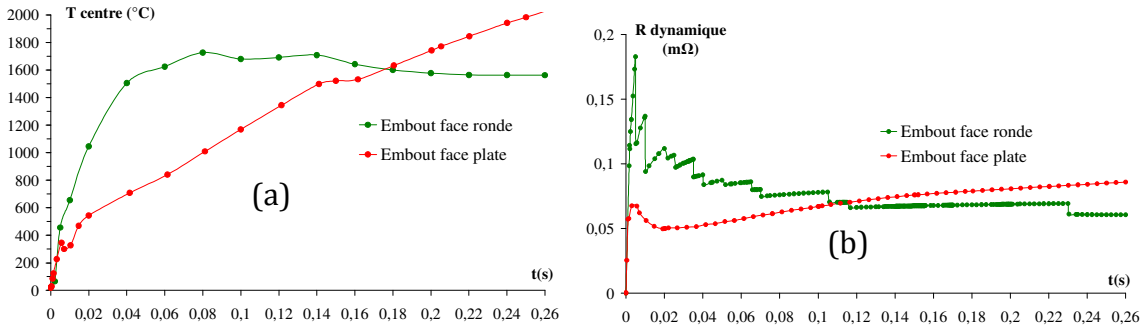


FIG. 8 - Comparaison des cinétiques thermiques numériques au plan de contact T/T (a) et des évolutions des résistances dynamiques (b) dans les deux configurations électrodes neuves à embouts rayonnés et électrodes usagées à embouts aplatis.

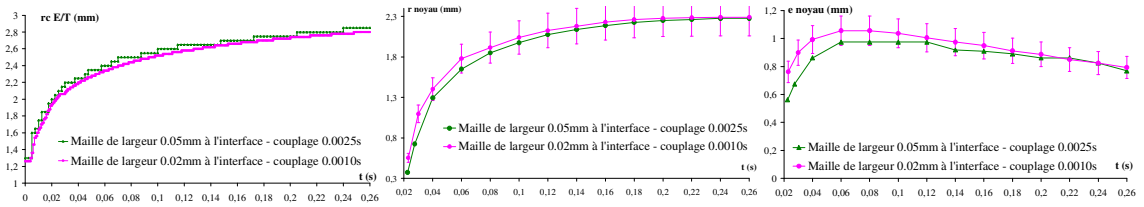


FIG. 9 - Optimisation du raffinement du maillage et du macro pas de temps de couplage mécanique– Conséquences sur le développement du noyau.