

Caractérisation des conditions de contact pour le soudage par point

E. GESLAIN^a, P. ROGEON^a, T. PIERRE^a, C. POUVREAU^a,
L. CRETTEUR^b

a. Université Bretagne Sud, IRDL, UMR CNRS 6027, 56100 Lorient, France

edouard.geslain@univ-ubs.fr

b. ArcelorMittal Global R&D, BP 30109, 60761 Montataire Cedex, France

Résumé :

Cette étude porte sur les échauffements interfaciaux dans un assemblage dissymétrique de trois tôles soudé par résistance par point. Le phénomène est d'abord observé à l'aide d'une caméra thermique. Ces échauffement étant imputables aux résistances de contact électrique et thermiques, des mesures sont réalisées sur le dispositif de soudage en fonction de la pression de contact. Ces valeurs pourront être utilisées comme données d'entrées dans les modèles numériques.

Abstract :

This study deals with the origin of heating at interfaces in a dissymmetrical assembly welded by resistance spot welding. This phenomenon is firstly observed with an infrared camera. These heating's are due to the electrical and thermal contact resistances whose measurements are done on the spot-welding machine versus pressure. These measurements can be used for numerical simulation.

Mots clefs : Soudage par point, thermographie infrarouge, résistance de contact

Nomenclature :

E/T : Electrode / Tôle

T/T : Tôle / Tôle

R_{CE} : Résistances de Contact Electrique [$\Omega.m^2$]

R_{interface} : résistance d'interface incluant la résistance de constriction et la résistance ohmique de l'épaisseur de revêtement [W]

R_{matière} : résistance de matière entre deux interfaces [W]

Ac : aire de contact [m²]

U : tension [V]

I : intensité du courant [A]

F : force de serrage des électrodes [N]

p_i : pression de contact [MPa]

J_i : densité de courant [A.m⁻²]

r_{ci} : rayon de contact [m]

i : indice de numéro d'interface

1 Introduction

Dans l'industrie automobile, les tôles d'acier sont majoritairement soudées par résistance par point. Dans ce procédé, un courant électrique de plusieurs milliers d'ampères permet d'atteindre la fusion des tôles par effet Joule. Pour ce faire, les tôles sont pincées entre des électrodes en cuivre allié avec un effort de quelques kilonewtons. Les conditions interfaciales jouent un rôle majeur sur les échauffements et les pertes de chaleur au cours du procédé. Les résistances de contact thermique participent au confinement de la génération de chaleur surfacique dans les premiers instants mais jouent un rôle à plus long terme sur les pertes de chaleur vers les électrodes [1]. Les résistances de contact électrique (R_{CE}) participent à la génération de chaleur par effet Joule aux interfaces.

Elles peuvent être mesurées soit sur le dispositif de soudage [2] soit sur un dispositif dédié [3]. L'utilisation de ce type de dispositif permet de bien contrôler l'évolution de la pression et de la température mais la cinétique est très éloignée des conditions de soudage. Les mesures de R_{CE} en fonction de la température au cours du soudage est compliquée en raison des échauffements très rapides et de l'évolution des aires de contact.

L'utilisation de revêtements différents dans des assemblages de tôle de plus en plus complexes amène à rencontrer de nouveaux couples de matériaux en contact et donc de nouvelles résistances de contact. Le cadre de cette étude est fourni par le cas d'un assemblage dissymétrique de trois tôles – dissymétrie en nature, en épaisseur et en revêtement - pour lequel des difficultés de soudabilité sont rencontrées.

Dans un premier temps, les échauffements initiaux sont observés par thermographie infrarouge dans une configuration de demi-point [4]. Ensuite la méthode de mesure des R_{CE} est présentée. Enfin, un calcul approché de la densité de puissance à chaque interface permet de corréler les R_{CE} mesurées et les observations par thermographie IR.

2 Observation des échauffement par caméra infrarouge

La figure 1 présente l'assemblage dissymétrique qui comprend :

- une tôle très fine d'AM54, un acier doux galvanisé,
- une tôle d'acier DP600, un acier ferrito-martensitique couramment utilisé en automobile
- une tôle d'Usibor® 1500, un acier martensitique embouti à chaud avec un revêtement aluminium-silicium.

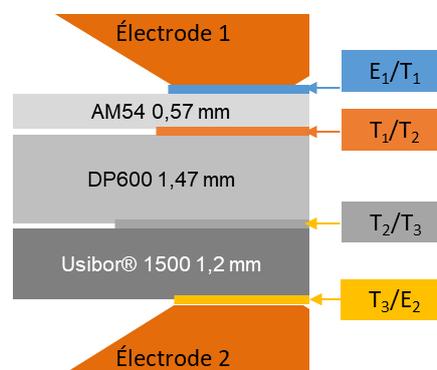


Figure 1 : empilement de l'assemblage dissymétrique et les interfaces.

Pour permettre l'observation des échauffements interfaciaux par caméra infrarouge, la soudure est faite sur la tranche des tôles avec des électrodes usinées pour avoir un demi-point (figure 2.a)[4]. Cette méthode nécessite d'adapter les paramètres de soudage pour conserver une densité de courant et une

pression de contact équivalente. La méthode du demi-point est limitée aux échauffement initiaux. Dès que la fusion de l'une des tôles est atteinte, le bain fondu déborde par la surface libre et la condition d'axisymétrie est perdue.

La soudeuse est une GYSPOT à courant redressé-lissé munie d'une pince pneumatique. Pour l'assemblage dissymétrique, les paramètres de soudage de référence sont : 8,5 kA, 320 ms, 400 daN. Pour le soudage en demi-point, une intensité de 4.25 kA et un effort de 200 daN sont utilisés. Les électrodes sont en CuCr1Zr et présentent un rayon de courbure de 32 mm sur une face active de 12 mm de diamètre.

La caméra thermique est positionnée à 300 mm à l'aplomb des électrodes (figure 2.b). Il s'agit d'une FLIR X6580sc avec un objectif microscopique grande distance. La vitesse d'acquisition est de 660 images par seconde et la gamme de température est comprise entre 300 °C et 1500°C (température de corps noir) grâce à un filtre passe-bande et les pixels mesurent 15x15 µm².

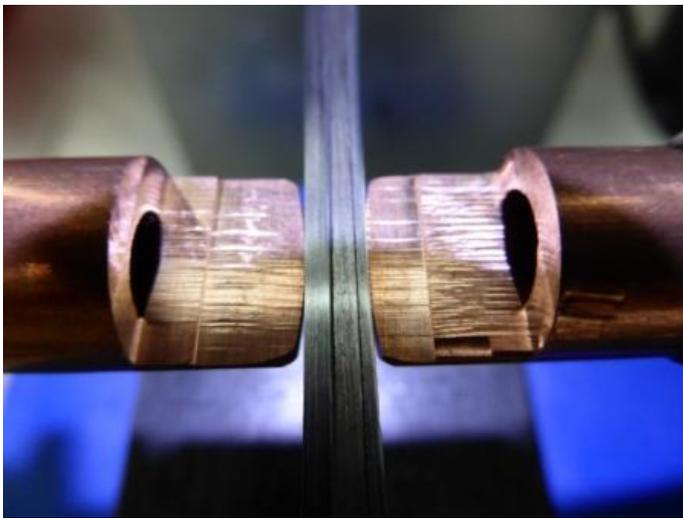


Figure 2.a : électrodes et tôles dans la configuration demi-point.



Figure 2.b : montage de la caméra au-dessus de la pince de soudage.

La figure 3 présente les thermogrammes dans les premiers instants du soudage, jusqu'à l'apparition d'un noyau fondu à 100 ms. Les thermogrammes sont étudiés pour cette étude de manière qualitative, l'échelle de température étant adaptative et l'émissivité étant fixée à 1. La complexité de la zone visée, tant du point de vue géométrique avec la présence d'interfaces, que du point de vue matériau avec les revêtements, rend très difficile l'évaluation des émissivités et donc des températures pour chaque pixel.

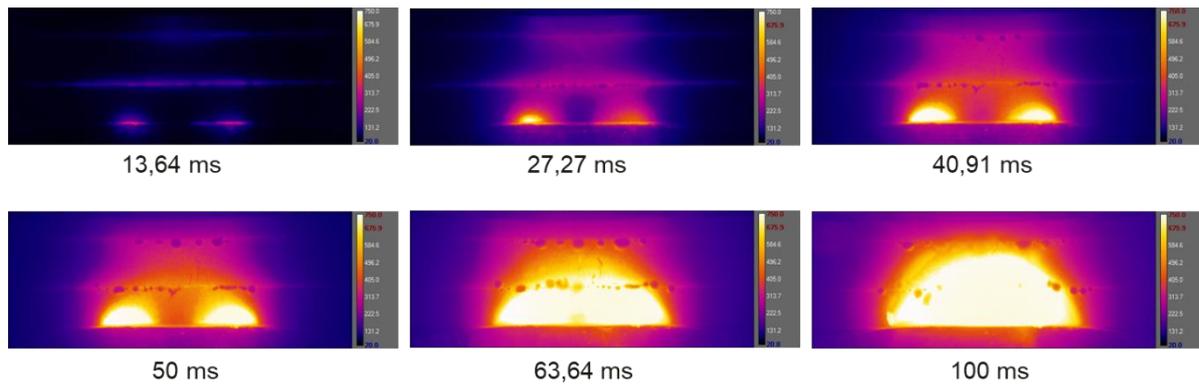


Figure 3 : thermogrammes à différents temps.

Le premier thermogramme à 13,64 ms met bien en évidence les interfaces qui sont sujettes à la génération de chaleur. Il y a les interfaces tôle/tôle (T_1/T_2 et T_2/T_3) d'une part, et l'interface entre l'Usibor® et l'électrode du bas (T_3/E_2) d'autre part. A cette interface, l'accroissement de la densité de courant sur la partie externe du contact électrode/tôle est à l'origine des points chauds visible sur les côtés du contact [5], [6], en plus de l'action des résistances de contact. Avec le temps, les points chauds de part et d'autre du contact T_3/E_2 se développent vers le haut de l'assemblage. A 100 ms de soudage, le noyau apparaît sur les deux tôles épaisses (DP600 et d'Usibor®). Les points noirs qui apparaissent sur les thermogrammes dès 27,27 ms correspondent à du revêtement fondu. Du zinc dans un premier temps puis de l'aluminium-silicium.

Pour expliquer cette dissymétrie d'échauffements, les résistances de contact électriques sont donc mesurées sur le dispositif de soudage lors de la phase d'accostage dans une configuration de soudage standard (électrodes entières).

3 Mesures des résistances de contact électriques

La mesure de R_{CE} sur le dispositif de soudage se fait pendant la phase d'accostage en mesurant la tension entre chaque élément (électrode et tôle) avec un courant de mesure de 1 ampère qui traverse l'empilement. La résistance calculée à partir de la tension et de l'intensité entre deux élément inclue la résistance de contact entre ces deux éléments et une part de résistance de matière entre le fil de mesure et l'interface (eq. 1).

$$R_{interface} = \frac{U}{I} = R_{matière} + \frac{R_{CE}}{A_c} \quad (1)$$

A_c est l'aire de contact initiales mesurée à l'aide de papier pressosensible placé entre chaque élément. La taille des marques (figure 4) est mesurée par un traitement d'image. Les empreintes sont mieux marquées sur les contacts électrode/tôle et à l'interface T_1/T_2 . Entre de l'Usibor® et le DP600 (T_2/T_3) qui sont des tôles plus rigides, l'effort est réparti sur une surface plus importante. En périphérie du contact, seules quelques rugosités soumettent le papier à la pression suffisante pour le marquer.

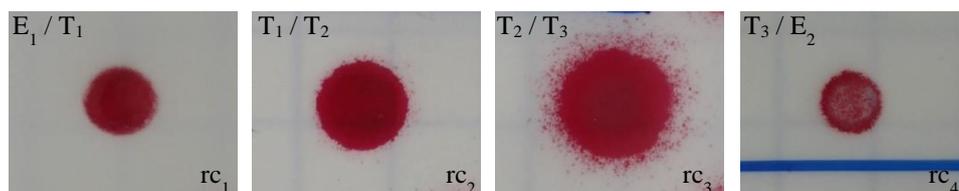


Figure 4 : empreintes sur papier pressosensible.

$R_{matière}$ correspond à la résistance de matière entre les fils de mesure. En négligeant la déformation élastique des tôles, les valeurs de $R_{matière}$ sont supposées constantes et sont présentées dans le tableau 1.

$R_{matière} E_1/T_1$	$R_{matière} T_1/T_2$	$R_{matière} T_2/T_3$	$R_{matière} T_3/E_2$	
1,995	9,882	14,9185	7,0315	$\times 10^{-3} m\Omega$

Tableau 1 : valeur de résistance de matière entre les points de mesure.

La montée de l'effort se fait manuellement jusqu'à 4000 N, et la mesure des tensions entre chaque élément est faite en continu. Les R_{CE} ainsi calculées sont présentées dans la figure 5.

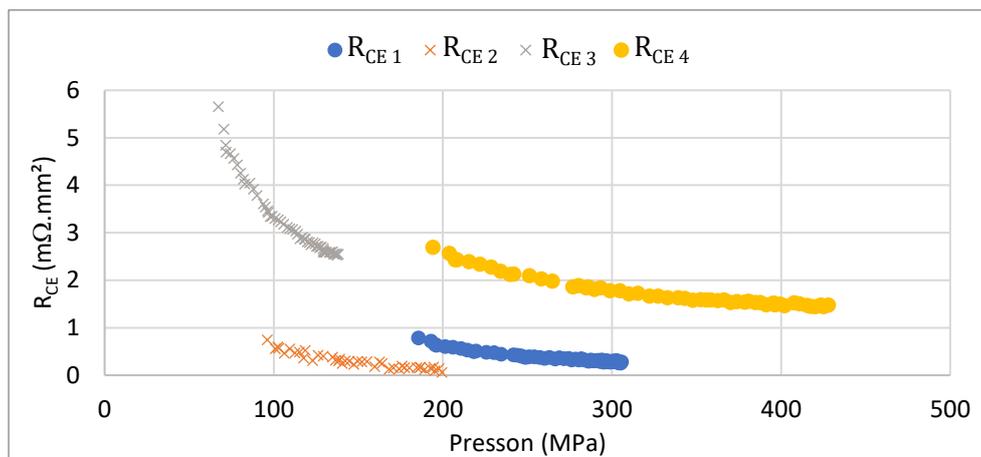


Figure 5 : mesures des R_{CE} en fonction de la pression sur les 4 interfaces.

Les aires de contact étant différentes, les R_{CE} ne sont pas mesurées pour les mêmes pressions. Les $R_{CE} 1$ et 4 correspondant aux interfaces électrodes tôles (points bleu et jaune) sont à des pressions plus importantes du fait de l'aire de contact plus faible. Une différence de niveau est flagrante entre la tôle zinguée ($R_{CE} 1$) et la tôle aluminisée ($R_{CE} 4$) avec un facteur 6 à 300 MPa. Les $R_{CE} 2$ et 3 sont mesurées pour des pressions plus faibles mais on retrouve une grande différence entre un contact uniquement zingué ($R_{CE} 2$) et l'interface entre le DP600 et l'Usibor® ($R_{CE} 3$) avec un facteur 7 entre les deux.

Des mesures de R_{CE} avec un revêtement Al-Si ne sont pas disponibles dans la littérature dans des conditions équivalentes. La $R_{CE} 2$ peut être comparée avec des mesures faites antérieurement sur un dispositif expérimental [7] (figure 6). La continuité entre les mesures *ex situ* et *in situ* permet de confirmer la validité de la méthode de mesure *in situ*.

Les R_{CE} évoluent suivant une loi puissance (eq. 2) dont les coefficients sont présentés dans le tableau 2.

$$R_{CE}(p) = R_0 p^{-n} \quad (2)$$

	$R_{CE} 1$	$R_{CE} 2$	$R_{CE} 3$	$R_{CE} 4$
R_0	16959	59143	379,75	124,72
n	1,929	2,477	1,023	0,741
Moyenne des résidus	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$2,85 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$3,73 \cdot 10^{-3}$
Ecart-type des résidus	0,01836	0,04831	0,09749	0,04894

Tableau 2 : coefficients des lois de $R_{CE}(p)$.

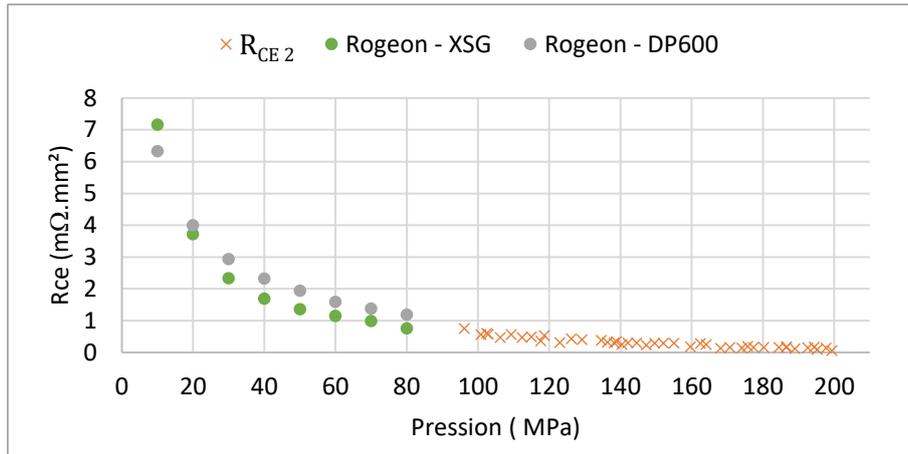


Figure 6 : mesure de R_{CE2} et mesures équivalentes faites sur un dispositif expérimental [7].

4 Exploitation des mesures

A partir des éléments ci-dessus, un calcul de la densité de puissance au niveau de chaque interface peut être établi. Le rayon de contact mesuré (figure 7.a) permet de calculer la pression de contact (eq. 3, figure 7.b) et la densité de courant (eq. 4, figure 7.c). Cette dernière est calculée avec une intensité de 100 A qui correspond à la première milliseconde de soudage. A cet instant, les rayons de contact n'ont pas encore évolué et les valeurs sont celles atteintes à l'issue de la phase d'accostage.

$$p_i = \frac{F}{\pi \cdot r_{ci}^2} \quad (3)$$

$$J_i = \frac{I}{\pi \cdot r_{ci}^2} \quad (4)$$

Les pressions de contact et les densités de courant ainsi calculées sont des moyennes sur toute l'aire de contact. Dans les faits, la pression de contact et la densité de courant ne sont pas uniformes sur l'aire de contact. La résistance de contact est calculable à parti de la loi établie précédemment (eq. 2, figure 6.d).

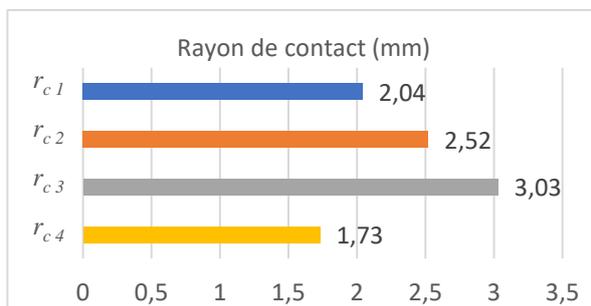


Figure 7.a : rayons de contact.

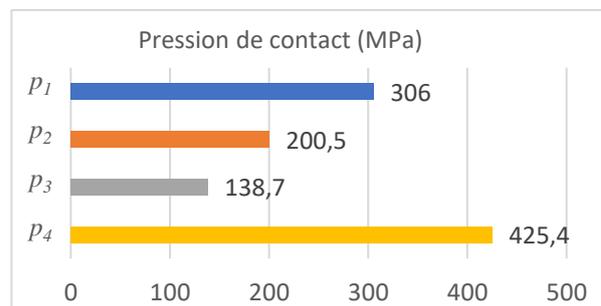


Figure 7.b : pressions de contact.

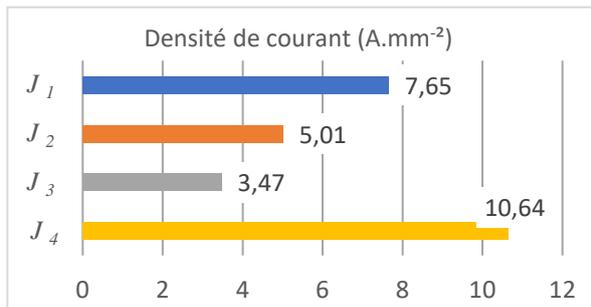


Figure 7.c : résistances de contact électrique.

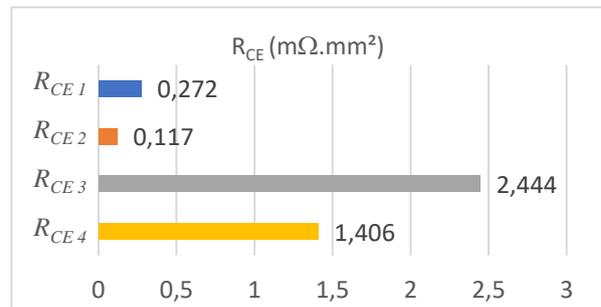


Figure 7.d : densités de courant.

Enfin, la densité de puissance (eq. 5, figure 8) qui est le produit de la R_{CE} par le carré de la densité de courant peut être représenté pour chaque interface.

$$Q_J = R_{CE} \cdot J^2 = R_0 \cdot I^2 \cdot F^{-n} \cdot A_c^{(n-2)} \quad (5)$$

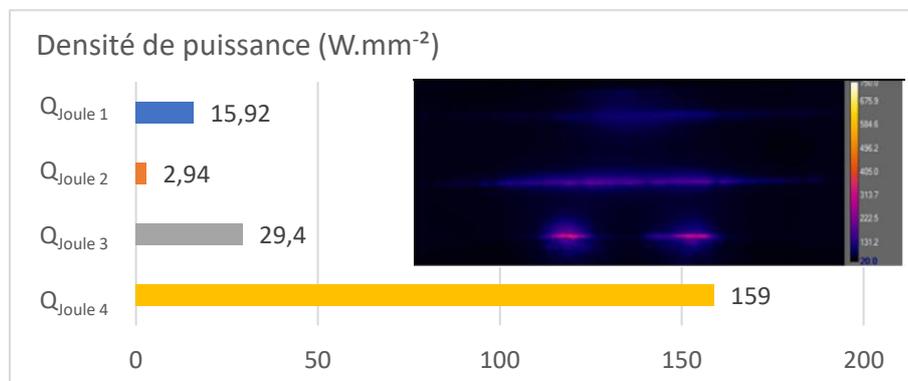


Figure 8 : Densité de puissance au niveau de chaque interface.

La densité de puissance générée à l'interface T₃/E₂ est 10 fois supérieure à celle générée de l'autre côté de l'assemblage. Cette différence est bien visible sur les thermogrammes obtenus en demi-point. Aux interfaces T/T, celle avec le revêtement Al-Si chauffe plus vite (figure 3) ce qui correspond bien au niveau supérieur de R_{CE3}. Les résistances de contact associées au revêtement Al-Si traité thermiquement que l'on trouve sur la tôle d'Usibor® sont nettement plus élevées que celles associées au revêtement de zinc des tôles galvanisées.

La densité de puissance à l'interface E₁/T₁ est plus importante qu'à l'interface T₁/T₂ ce qui n'est pas visible sur les thermogrammes. Dans les faits, le pompage thermique des électrodes au niveau de l'interface limite les échauffements à ces endroits. La résistance de contact thermique d'un contact cuivre-zinc étant faible [8], le refroidissement des électrodes est d'autant plus efficace.

Cette densité de puissance est amenée à évoluer très rapidement à travers l'augmentation rapide de l'intensité d'une part, et avec l'augmentation de l'aire de contact d'autre part. De plus, l'évolution des R_{CE} [1] avec la température est très différente de la loi puissance utilisée ici.

Conclusions

Les échauffements interfaciaux résultent d'une compétition entre les évolutions des résistances de contact et de la densité de courant qui dépendent tous les deux de l'aire de contact. Plus l'aire de contact est grande, plus la R_{CE} sera importante mais plus la densité de courant sera faible.

Cette méthode de calcul donne une densité de puissance moyenne sur l'aire de contact. Dans les faits, la pression de contact n'est pas homogène [9], tout comme la densité de courant [10]. De plus, la pression de contact appliquée sur la tôle d'AM54 cause une déformation plastique de la tôle. La partie $R_{matière}$

calculée à partir de l'épaisseur de la tôle est donc plus faible que celle prise en compte ici. Cependant, la partie $R_{matière}$ est faible par rapport à la R_{CE} (6,6 % à l'interface E_1/T_1).

Les résistances de contact avec le revêtement Al-Si traité thermiquement s'avère être beaucoup plus élevées que celles avec le revêtement de zinc. Il permet d'avoir un échauffement plus rapide et plus intense ce qui permet d'obtenir un noyau avec un courant plus faible et avec un temps de soudage plus court.

Dans le cas d'un assemblage dissymétrique comme celui étudié ci, la différence trop prononcée des densités de puissance décale l'initiation et le développement du noyau vers les tôles épaisses. Les phénomènes de diffusion thermique non présentés ici favorisent la dissymétrie des échauffements [1]. Parmi les solutions envisagées, l'utilisation d'électrodes différentes entre le haut et le bas de l'assemblage ou l'utilisation d'un revêtement supplémentaire entre l'électrode et la tôle fine d'AM54 permettrait de compenser la dissymétrie entre les échauffements.

Références

- [1] E. Geslain, "Soudage par résistance des tôles fines revêtues : formation du noyau dans un assemblage de trois tôles," Université Bretagne Sud, 2018.
- [2] M. Galler, W. Ernst, R. Vallant, and N. Enzinger, "New Method for Measuring the Electrical Contact Resistance During," in *Mathematical Modelling of Weld Phenomena*, 2009.
- [3] S. S. Babu, M. L. Santella, Z. Feng, B. W. Riemer, and J. W. Cohron, "Empirical model of effects of pressure and temperature on electrical contact resistance of metals," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 6, no. 3, pp. 126–132, 2001.
- [4] Y. Cho and S. Rhee, "Experimental study of nugget formation in resistance spot welding," *Weld. J.*, vol. 82, no. 8, pp. 195–201, 2003.
- [5] J. H. Kim, Y. Cho, and Y. H. Jang, "Estimation of the weldability of single-sided resistance spot welding," *J. Manuf. Syst.*, vol. 32, no. 3, pp. 505–512, 2013.
- [6] W. Zhang, D. Sun, L. Han, and Y. Li, "Optimised design of electrode morphology for novel dissimilar resistance spot welding of aluminium alloy and galvanised high strength steel," *Mater. Des.*, vol. 85, pp. 461–470, 2015.
- [7] P. Rogeon, P. Carre, J. Costa, G. Sibilgia, and G. Saindrenan, "Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 195, no. 1–3, pp. 117–124, 2008.
- [8] P. Carré, P. Rogeon, E. Dupe, G. Deruet, and G. Sibilgia, "Détermination des paramètres interfaciaux pour la modélisation du soudage par point de tôles d'acier revêtues," in *JITH*, 2005, vol. 2, pp. pp287-290.
- [9] Y. Lu, A. Peer, T. Abke, M. Kimchi, and W. Zhang, "Subcritical heat affected zone softening in hot-stamped boron steel during resistance spot welding," *Mater. Des.*, vol. 155, pp. 170–184, 2018.
- [10] R. N. Raelison *et al.*, "Contact conditions on nugget development during resistance spot welding of Zn coated steel sheets using rounded tip electrodes," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 8, pp. 1663–1669, 2012.